<

Chapitre 5. Modélisation

TABLE DES MATIERS DU CHAPITRE 5

Chapitre 5. Modélisation 116

5.1 Construction du systeme d'information geographique 118

5.1.1 Introduction 118

5.1.2 Petit historique des SIG 120

5.1.3 Application d'ArcView au bassin versant de Voinesti 121

5.1 CONSTRUCTION DU SYSTEME D’INFORMATION GEOGRAPHIQUE

5.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, on se propose de présenter certains des aspects théoriques et pratiques des Systèmes d’Information Géographique (SIG) et de détailler l’application faite sur le bassin versant de Voinesti. Comme il s’agit d’un outil relativement « nouveau », la première partie sera consacrée à des notions de base et à quelques définitions relatives au SIG et à l’analyse spatiale.

On trouve de nombreuses définitions pour le SIG qui véhiculent toutes des expressions communes touchant à la cartographie, aux bases de données et à l’analyse spatiale. Cette variété reflète la dynamique de cet outil et de son évolution. L’une des ces définitions a retenu notre attention pour sa clarté et sa généralité. C’est celle donnée en 1989 par la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection : « un SIG est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de ressembler et organiser, de gérer, de combiner, d’élaborer et de présenter des informations localisées contribuant notamment à la gestion de l’espace ».

Le SIG s’avère un outil puissant au travers de sa capacité à représenter la réalité sous la forme de cartes thématiques par couche d’information (*layer* –distribution spatiale d’une catégorie d’entité paramétrable). Un SIG permet aussi de croiser les données de sources différentes (*overlay*). Une troisième propriété fondamentale est la possibilité de gérer une large base de données (SGBD).

Il ne faut pas réduire la compréhension d’un SIG à une simple interprétation des résultats obtenus à partir de données extraites par des requêtes préétablies. Chaque problème de gestion ou d’aménagement de territoire est un problème unique qu’il faut traiter individuellement. Pour mettre en œuvre un SIG, il est nécessaire de suivre la démarche décrite par les étapes suivantes :

- définir l’objectif du projet de SIG ;
- acquérir les données pertinentes ;
- géoréférencer les données acquises ;
- traiter les données et interpréter les résultats ;
- établir le rapport final.

L’objectif d’un projet de SIG est lié à son domaine d’application, qui peut être : militaire, administratif (urbanisme, transport, télécommunication), commercial (identification des

marchés), économique (ressources naturelles, agriculture, etc.), d'éducation, de recherche (géologie, hydrologie, etc.).

L'acquisition des données est réalisée en fonction de cet objectif. Elle consiste à partir de données provenant de sources extérieures au SIG, à les transposer dans un format numérique compatible. Les principales sources de données sont les cartes thématiques classiques, l'imagerie satellitaire, les photogrammes, etc. Diverses méthodes de saisies des données sont pratiques : codage manuel, digitalisation à l'aide d'un table à numériser ou par saisie directe à l'aide de la souris, vectorisation automatique d'images scannées à l'aide d'un logiciel adapté (par exemple, MapScan) et transfert des données provenant de sources informatiques distantes (Internet, par exemple).

L'étape de géoréférencement consiste à transformer les cordonnées intrinsèques d'un thème vectoriel (x, y) en coordonnées cartographiques (latitude, longitude). A l'issue de cette étape nous avons déjà créé une première base de données. Les informations géographiques liées à la zone étudiée sont stockées non seulement sous forme de cartes thématiques, mais aussi sous formes des tableaux. Dans ces tableaux, ou table attributaire, on retrouve des informations géographiques (par exemple, coordonnées x, y, z) et attributives (par exemple, coefficients de rugosité).

L'analyse spatiale, qui recouvre l'étape suivante de traitement des données, est la discipline géomatique qui consiste à étudier et à traiter quantitativement et qualitativement les informations spatiales. L'objectif est de détermination leur distribution dans l'espace et d'identifier de nouvelles informations pratiques. L'analyse spatiale se décline en deux directions : l'analyse *singulière* (appliquée à une seule couche thématique) et l'analyse *multiple* (croisement de plusieurs couches thématiques). Dans le cas de l'analyse singulière, l'utilisateur peut réaliser les opérations suivantes : manipulations géométriques (changement d'échelle, correction de données, changement de projection ou de coordonnées), mesurages (longueur, périmètre, aire), interrogations spatiales ou non spatiales (en fonction de l'attribut), modification des attributs. Un résultat particulièrement intéressant de l'analyse spatiale singulière est l'opération d'interpolation sur les données d'altitude permettant de construire le modèle numérique de terrain (MNT, ou MDE pour *modèle digital d'élévation,* ou MDA pour modèle digital d'altitude). Un MNT est une représentation de la topographie. Le support d'un tel modèle peut être une représentation *raster* (division régulière de l'espace sous forme de mailles généralement carrées) ou vectoriel (set de points de mesure). Le MNT peut être utile non seulement pour la représentation du relief, mais aussi des applications en géologie, pédologie, hydrologie, science du sol, etc.

Une opération fondamentale de l'analyse spatiale multiple est la superposition de deux ou plusieurs entités spatiales, par exemple les pentes avec la végétation. Une autre opération importante est l'analyse des surfaces par dérivation du MNT pour obtenir la carte la pente, de l'exposition ou de l'ombrage. Parmi les autres fonctions de l'analyse spatiale multiple on peut citer : la modélisation cartographique, l'analyse de réseaux, etc.

5.1.2 Petit historique des SIG

Le premier « SIG » a été construit en 1785 aux Etats-Unis dans le cadre du « Public Land Survey » et il a été utilisé dans un but de cartographie.

L'évolution des techniques a permis à Hollerith d'établir en 1890 les bases de l'automatisation de la cartographie à l'aide de cartes perforées.

L'ère moderne du SIG a débuté avec la cartographie informatisée et la télédétection satellitaire. A partir de 1970 la technique de digitalisation est apparue et s'est développée dans deux directions : l'une orienté vers le perfectionnement de la cartographie et la deuxième vers le développement des techniques de l'analyse spatiale.

C'est dans ce contexte qu'est apparu en 1964 le premier véritable SIG : Canadian Geographic Information Systeme (CGIS), qui a servi à gérer des ressources naturelles.

A partir de 1964, les techniques de SIG ont été en plus utilisées dans des domaines très différents : projet d'aménagement (DELMARKA –1966), projet de visualisation du relief, etc.

Le premier logiciel commercial a été diffusé par la société ESRI sous le nom d'ARCINFO.

Aujourd'hui, parmi les logiciels de SIG les plus répandus, nous retenons :

- IDRISI (réalisé à l'Université Clark aux Etats-Unis) est un SIG dédié *raster* et qui comporte de nombreuses fonctions de traitement d'images acquises par télédétection. Ce SIG se distingue par la diversité de ses fonctions d'analyse spatiale, mais il est limité dans le domaine de la gestion des données attributaires et dans la représentation cartographique des résultats. IDRISI a été écrit en Pascal de Borland et en Visual Basic ; il fonctionne pour différentes plates-formes.

- SPANS (Spatial Analysis System) a été créé par TYDAC Resarch, Canada. C'est un système modulé et flexible qui permet la réalisation de projets en fonction du type de données disponibles et de problèmes étudiés.

- ARCINFO a été créé par la société ESRI (Enviromental Systems Research Institute) aux Etats-Unis. C'est un SIG écrit dans en Fortran 77 et en C ce qui le rend étant indépendant du système opérationnel et du type de matériel. Il travaille en mode

vecteur, ce qui suppose que chaque entité géographique est représentée dans l'espace par ses coordonnées x, y, z. Les dernières versions d'ArcView (versions d'ArcInfo adaptée à une utilisation courante) 3.0, 3.2, 8.1 sont conviviales et leurs fonctions spatiales se sont beaucoup améliorées au cours du temps. Ces versions sont compatibles avec un certain nombre de modules hydrologiques complémentaires comme : Basin, Hydrologic Modeling (version d'évaluation), Watershed Delineator qui calcule le réseau hydrographique et le bassin versant, etc..

- GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) créé par les ingénieurs de l'Armée des Etats-Unis est un SIG dédié raster, capable de gérer et d'analyser des données spatiales. GRASS a été écrit en C et n'était disponible à l'origine pour pour les plates-formes UNIX. Récemment, il a été adapté sous LINUX (version d'UNIX adaptée aux PC) et sous WINDOWS, plus faciles à manipuler. Sa principale originalité est qu'il est libre (gratuit) et ouvert (son code est accessible), ce qui a permis à certains utilisateurs d'y associer des modules. Parmi ceux-ci, plusieurs concernent la modélisation hydrologique : ANSWERS, KINEROS, r.water.fea, etc..

5.1.3 Application d'ArcView au bassin versant de Voinesti

Pour une application hydrologique, la saisie des données dans un SIG se déroule en plusieurs étapes :

- l'analyse de la morphologie du bassin versant (réseau hydrographique et limites des sous-bassins versants) à partir du MNT;
- la numérisation du couvert végétal et de la pédologie, par digitalisation à partir des cartes thématiques,
- la spatialisation des données des variables mesurées ;
- l'organisation et la gestion des fichiers relatifs aux couches d'informations.

Pour réaliser l'intégration spatiale des données du bassin de Voinesti, nous avons choisi le SIG ArcView, outil puissant qui permet de visualiser, d'explorer et d'analyser les données géographiques. Il dispose d'extensions (programmes complémentaires) qui donnent accès à des fonctionnalités particulières pour géoréférencer les données géométriques, calculer le réseau hydrographique et les limites des bassins versants, les pentes, etc.

Les étapes de mise en œuvre un projet sous ArcView sont :

- l'acquisition des données ;
- le géoréférencement des thèmes acquis ;

- la création de cartes thématiques : topographie (courbes de niveau), pédologie, végétation ;
- la création du MNT ;
- le calcul du réseau hydrographique ;
- le calcul du bassin versant.

Pour la zone étudiée, nous disposons d'une carte topographique à l'échelle du 1/2000 (coupures L-35-99-C-b-4, L-35-99-C-d-2, L-35-99-D-a-3 et L-35-99-D-c-1) où sont notées aussi les différentes catégories de végétation. Nous avons aussi une carte pédologique à l'échelle du 1/5000. Ces cartes ont été scannées et les fichiers enregistrés au format standard TIFF, reconnu parmi d'autres formats par ArcView. Il faut Ensuite recaler ces images TIFF dans l'espace géographique. Pour cela, on a utilisé une version d'essai du module Géoref-Image qui permet de géoréférencer directement dans ArcView des images ou des thèmes vectoriels.

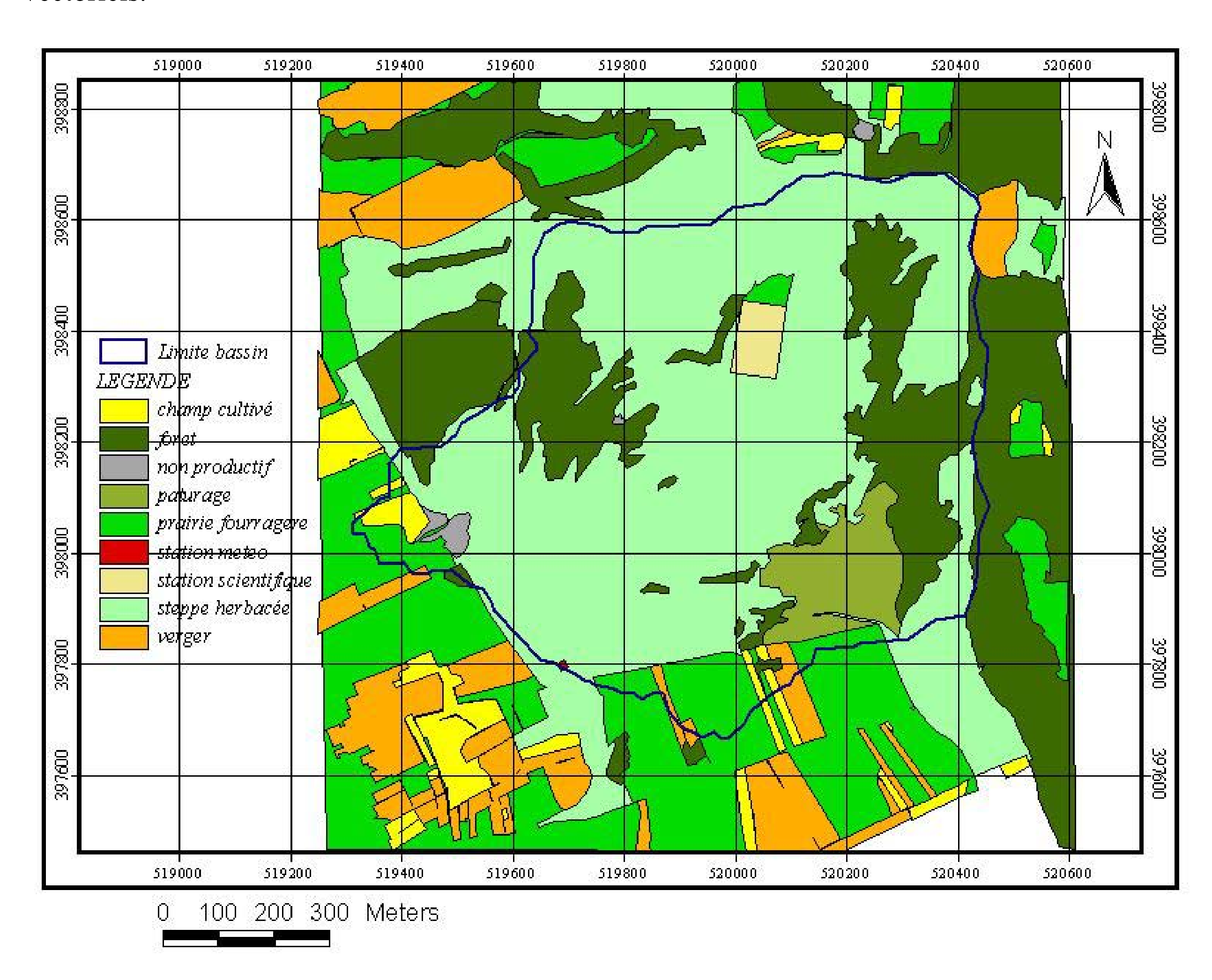


Figure 1 Types de végétation sur le bassin de Voinesti

L'étape suivante consiste à numériser sur les plans scannés et géoréférencés à la souris les lignes de niveau, les types des sols et de végétation de manière à créer une nouvelle information, non plus de type « image », mais de type « vectoriel » sous différents thèmes : topographie, plan d'occupation des sols (végétation, parcellaire) et les unités du sol.

A chaque couche (thème) informatique correspond une table attributaire et une légende où se trouve spécifié le type de végétation ou de sol. On peut introduire de nouvelles informations manuellement ou par calcul (aire d'un type de végétation, la longueur d'une ligne de niveau, son altitude, ses coordonnées x, y, z). Les figures suivantes (Figure 1, Figure 2) présentent les cartes de végétation et de sol obtenues avec ArcView.

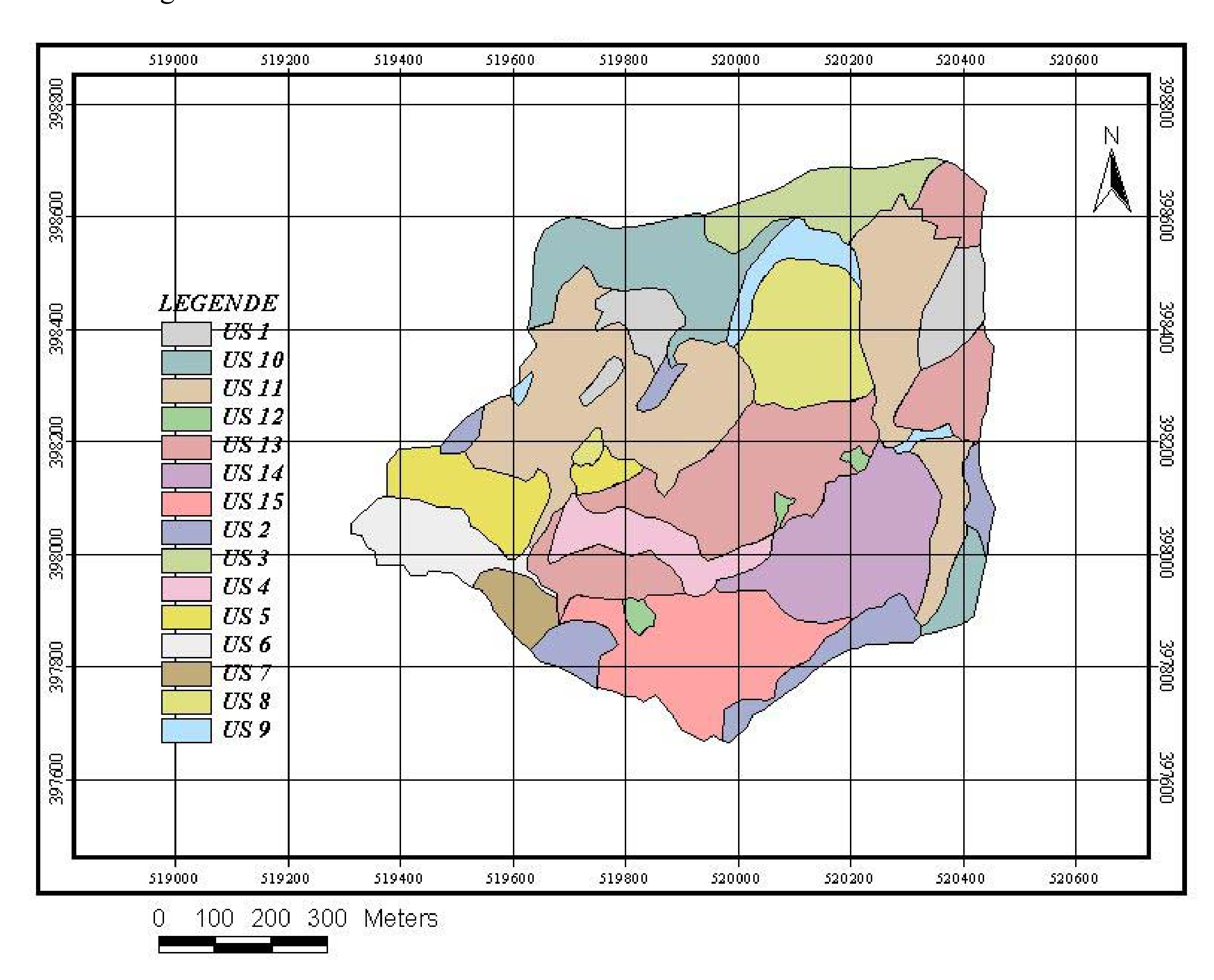


Figure 2 Types de sols sur le bassin versant de Voinesti.

Pour créer le MNT, nous utilisons l'extension Spatial Analyst d'ArcView. Elle propose deux méthodes d'interpolation : « spline » ou « IDW ». La méthode Spline convient à un grand nombre d'applications et elle est particulièrement bien adaptée aux surfaces sur lesquelles les variations peu brutales qu'il s'agisse, par exemple, d'une altitude ou de la profondeur d'une nappe phréatique. Elle consiste à faire passer une «bande de caoutchouc » par des points

d’appui choisis tout en minimisant la courbure de la ligne. On obtient ainsi une courbe lissée où un paramètre de «poids » reflète l’influence de la dérivée d’ordre trois dans l’expression de minimisation de la courbure. La méthode IDW (Inverse Distance Weighted) est appliquée à chaque point d’appui et a une influence locale qui diminue avec la distance. Les points qui se trouvent à proximité de la cellule de traitement ont plus de poids que ceux qui sont plus éloignées. Nous avons préféré pour notre application la fonction Spline pour obtenir finalement une grille d’altitude. La Figure 3 présente le MNT résultant en trois dimensions.

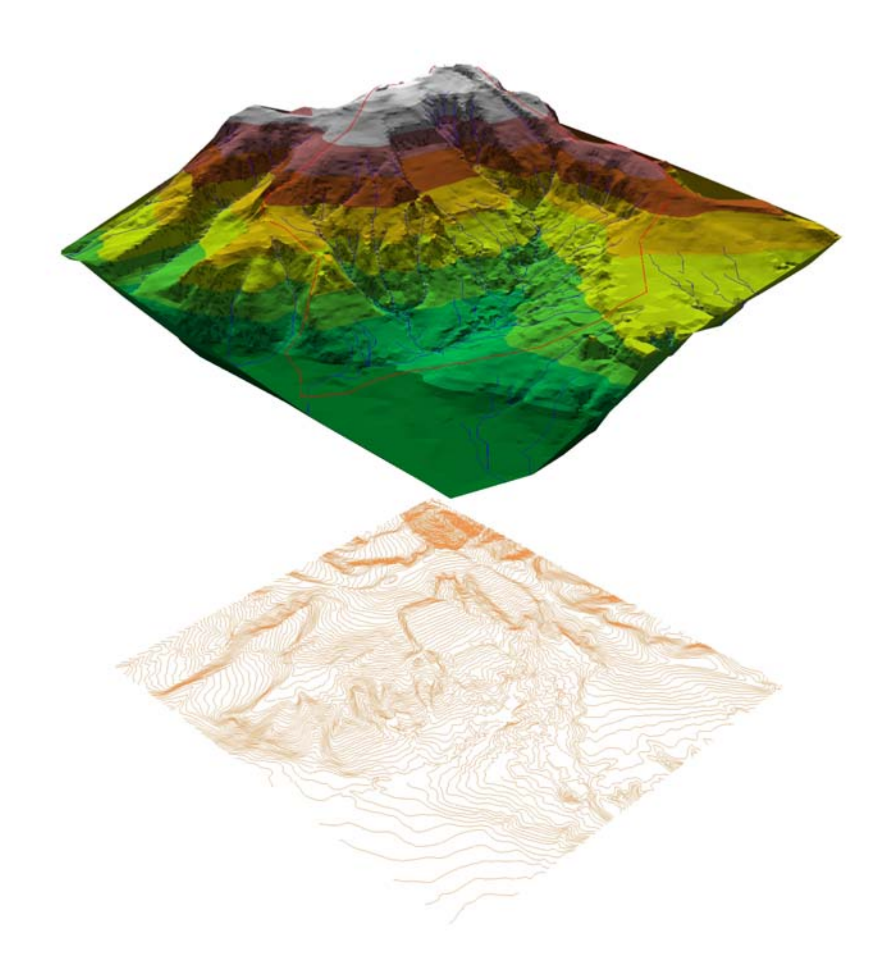


Figure 3 Le MNT (en haut) et les courbes de niveau (en bas) du bassin de Voinesti. La ligne rouge est la limite du bassin et les lignes bleues représentent le réseau hydrographique

Une fois le MNT créé, les fonctions d’analyse de surface permettent d’extraire de nouvelles informations : calcul de la pente (fonction qui permet de déterminer pour chaque maille la pente en fonction des mailles voisines), exposition (fonction qui permet de calculer pour chaque cellule la direction cardinale de l’exposition : 0° pour N, 90° pour E, etc.), l'ombrage (fonction qui permet de déterminer l’éclairage théorique d’une surface ; elle peut servir à déterminer la durée et l’intensité de l’ensoleillement).

La figure suivante (Figure 4) présente la carte des pentes obtenue pour le bassin versant de Voinesti.

On observe que les plus fortes pentes se trouvent dans le haut du bassin où se localisent les nombreux glissements de terrain stabilisés (voir chapitre 3).

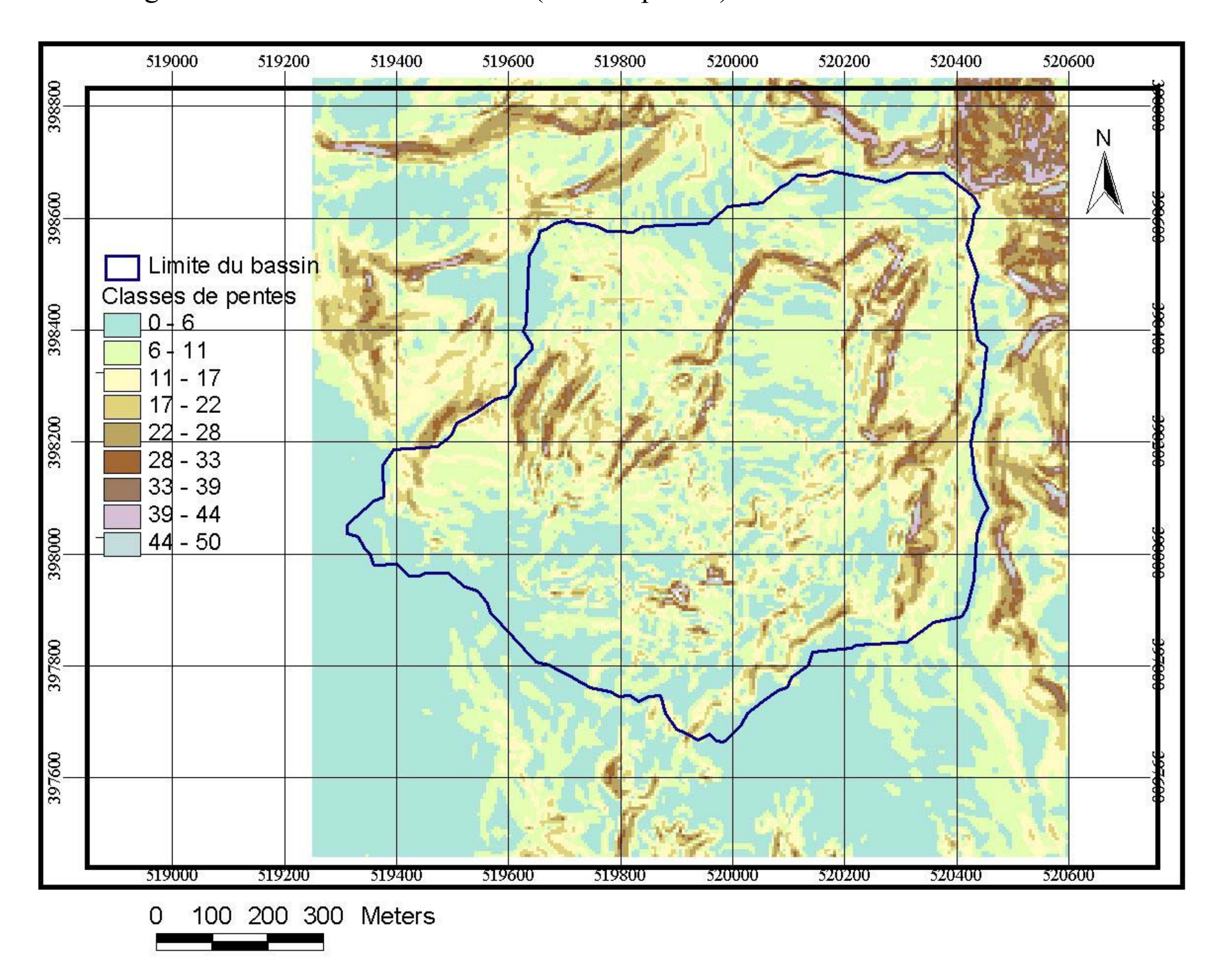


Figure 4 Classes de pente

Toutes sortes de requêtes spatiales peuvent être réalisées à l'aide de Spatial Analyst. Par exemple, nous pouvons calculer la superficie occupée par les différents types de végétation ou de sol en superposant la carte de la végétation ou des sols avec celle du bassin versant.

Sur la Figure 5 nous présentons les diagrammes de ces deux requêtes spatiales. Nous observons que le bassin versant est occupé majoritairement par la steppe herbacée (65%) et la forêt (20%). Si on rajoute à la steppe herbacée, les pâturages (5,95%) et la prairie fourragère (5,64%), on constate qu'approximativement 77% du bassin versant est occupé par un couvert herbacé. En ce qui concerne le sol, nous notons que l'unité 11 occupe 21% du total du bassin versant, l'unité 13, 16,5% du total, et les unités 14 et 15, 17%. Donc plus de la moitié du

bassin versant est occupée par des complexes de sols fortement érodés (voir tableau 1-chapitre 3).

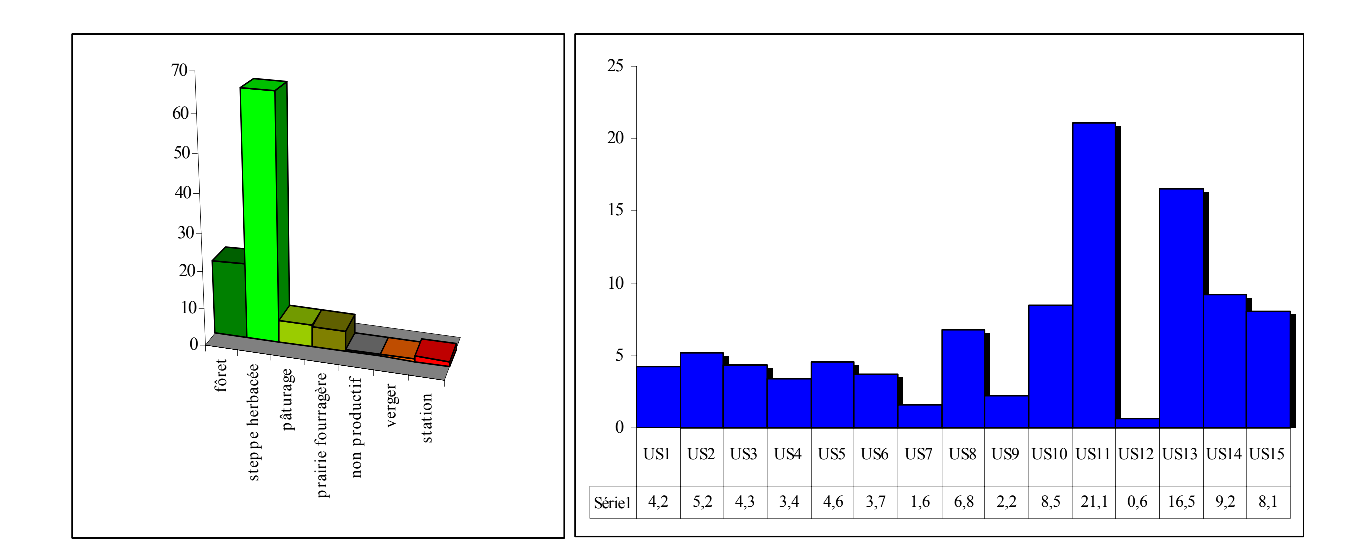


Figure 5 Requêtes spatiales végétation-superficie (à gauche) et sol-superficie (à droite)

Pour réaliser une analyse hydrologique, on a choisi d'activer le module «Bassin » qui donne les meilleurs résultats (Foucher, 2000) parmi les trois extensions dont nous avions la disponibilité. Ce module permet en particulier de calculer les limites et les surfaces des bassins versants en n'importe quel point et de tracer le réseau hydrologique, ainsi que de cartographier les directions d'écoulement.

Pour calculer le réseau hydrographique, il est nécessaire de spécifier le nombre de cellules d'accumulation d'eau nécessaires pour *créer* une rivière. Deux méthodes de hiérarchisation des chemins de l'eau sont proposées : la méthode de Strahler et la méthode de Shreve. Nous avons choisi la deuxième. La touche «flèche vers le bas » permet le calculer du bassin versant à l'endroit pointé par la souris. Un nouveau thème est crée et une nouvelle table attributaire est disponible qui fournit les informations suivantes concernant le bassin versant : aire, périmètre, longueur de rectangle équivalent, altitude max. et min.

Pour le bassin versant de Voinesti (pointage sur l'exutoire) le calcul donne dans la table attributaire du thème bassin : aire=0,76 km², périmètre=3,746 km, altitude min.=421,69 m, altitude max.=557,40 m, longueur max. du bassin=1,804 km, longueur du rectangle équivalent=1,276 km. Ces valeurs diffèrent peu de celles que nous avions établies par planimétrie et calcul : moins de 1% pour la superficie du bassin et 5,5% pour la longueur max. du bassin.

Il faut garder à l'esprit que le but de ce travail est de disposer sous une forme numérique de toutes les informations qui caractérisent une zone d'étude, en l'occurence le bassin versant de Voinesti, de manière à pouvoir ensuite les utiliser dans une autre application qui nécessite une information spatiale numérisée.

A l'origine, c'est pour utiliser le modèle ANSWERS que cette procédure a été établie, afin de modéliser l'écoulement superficiel et les processus d'érosion du sol.

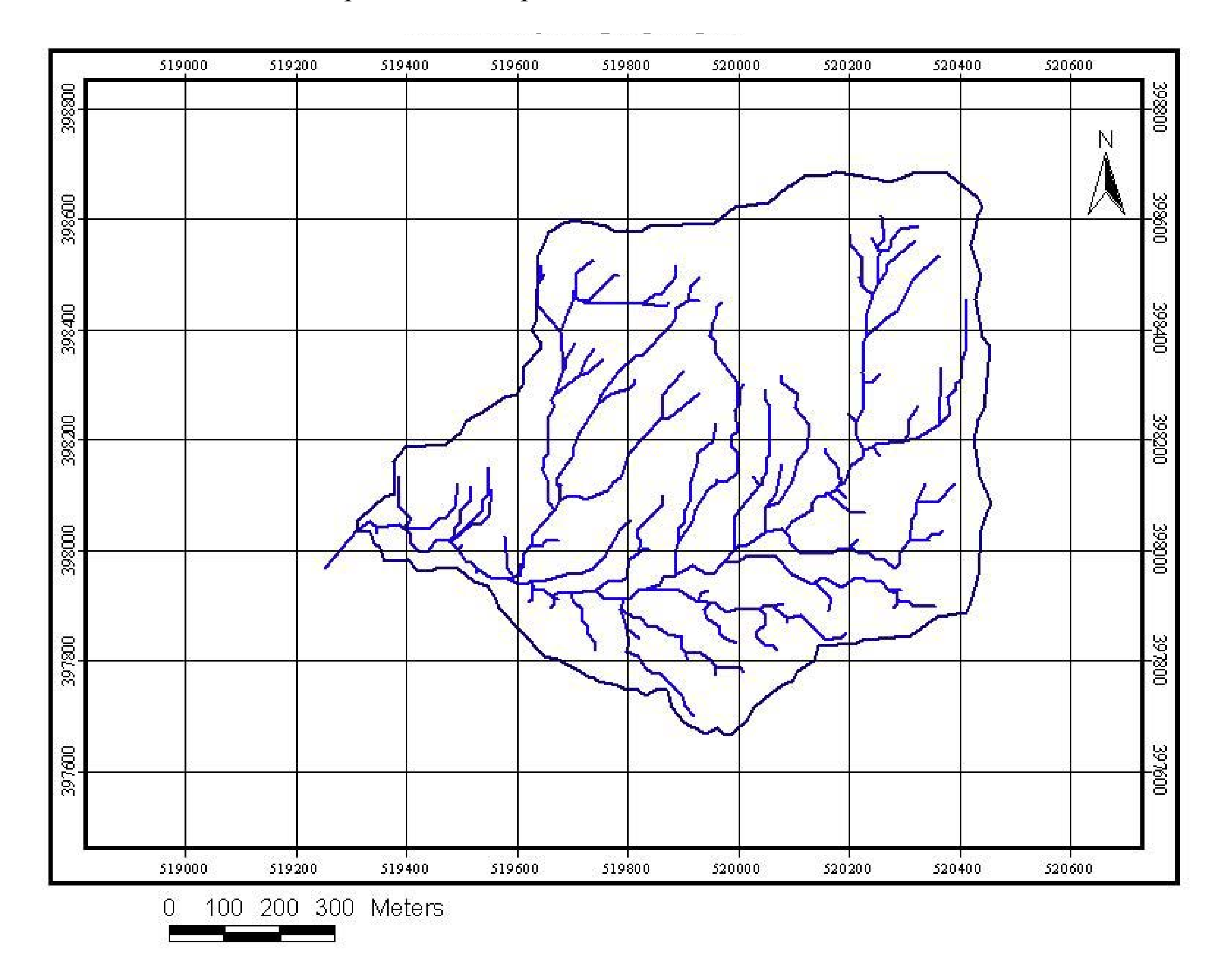


Figure 6 Le réseau hydrographique et la limite du bassin versant de Voinesti établis par le module « bassin » sous ArcView.

Il existe une version récente de ce modèle associée au SIG GRASS qui utilise les informations géographiques pour générer les variables d'entrées dans le format requis. ANSWERS utilise comme entrées :

- le masque du bassin versant ;
- la carte du sol et de la végétation ;
- le MNT et certains fichiers dérivés.

Comme GRASS est un SIG dédié raster, il est plus pratique d'exporter les données d'ArcView sous des formats acceptés par GRASS. Nous avons donc transformé tous les thèmes de forme ArcView en grilles raster que nous avons exporté sous un format RASTER ASCII.

Pour le modèle TOPOG, que nous avons également choisi d'utiliser, le MNT créé à l'aide du SIG ArcView ne convient pas. En effet, le modèle TOPOG contient un module d'analyse de terrain basé sur l'ancien modèle TAPES-C développé par Moore et al. en 1988, et modifié par Moore et Grayson en 1991. Ce modèle réalise son propre MNT. A la différence de modèles comme ANSWERS ou SHE qui utilisent un système de mailles carrées, le module d'analyse du terrain (DEMGEN) de TOPOG utilise un système basé sur le concept du tube de courant (« stream tube »), proposé par Onstand et Brakensiek en 1968. Il considère les courbes de niveau comme des lignes équipotentielles ; les tubes de courant sont alors orthogonaux aux courbes de niveau et ils peuvent être assimilés aux lignes de plus grande pente. Ce type de maillage réaliste tente de mieux représenter le mouvement naturel de l'eau sur les versants.

5.2 APPLICATION DU MODELE ANSWERS

5.2.1 Généralité à propos des étapes de mise en œuvre d'un modèle

Nous adoptons la démarche proposée dans une thèse récente (Kauark Leite, 1990) pour décrire les étapes de mise en œuvre d'un modèle hydrologique :

- Analyse du système ; dans cette phase, on évalue le niveau d'analyse pertinent pour résoudre le problème posé, c'est-à-dire la manière de représenter le système physique, en l'occurrence un bassin versant. Dans cette phase, on identifie les variables significatives pour décrire le système (variables d'état), son environnement (variables d'entrée ou variables de forçage), les variables de sortie et leurs interactions. Cette sélection dépend à la fois des objectifs fixés, des possibilités de mesure et des moyens expérimentaux disponibles.

- Calage ; les paramètres qui interviennent dans un modèle hydrologique peuvent être connus par la mesure ou par des tables extraites de la littérature, mais parmi ces paramètres certains restent inconnus. Le calage consiste à fixer une valeur pour ces paramètres inconnus en explorant des intervalles de possibilités par des processus itératifs successifs, du type essai-erreur. La qualité d'un calage est appréciée au moyen d'un critère de calage. Il en existe de nombreux parmi lesquels on retient :

  - La somme des écarts quadratiques qui s'exprime selon :

$$SEQ = \sum_{i=1}^{N} (y_{icalc} - y_{obs})^2$$

où : y_{icalc} et y_{iobs} sont les i-èmes valeurs calculées (simulées), respectivement observées (mesurées)

  - Le critère de Nash qui se définit de la manière suivante :

$$E\ Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_{iobs} - y_{sim})}{\sum_{i=1}^{N} (y_{obs} - \overline{y}_{obs})}$$

où : y_{iobsr} représente la valeur de variable observée (mesurée),

y_{isim} est la valeur de variable simulée (calculée),

$\overline{y}_{iobs}$ la valeur moyenne de la variable observée.

Le critère de Nash varie de -∞ pour un ajustement très mauvais à 1. Une valeur proche de 1 traduit une forte liaison entre les observations et les simulations. En l'absence de biais entre les observations et les simulations, la valeur est égale à celle du coefficient de détermination de la régression ($y_{iobsr,}$, y_{isim}).

- Le calcul de la droite de régression linéaire des simulations en fonction de l'observation et son coefficient de détermination. Le coefficient de détermination reflète le degré de linéarité entre deux séries de données.
- Le coefficient de corrélation ; ce coefficient n'est pas un indicateur suffisant et il faut également étudier la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression pour vérifier qu'il n'y a pas de surestimations ou de sousestimations systématiques.

- La validation du modèle ; dans cette étape on vérifie l'adéquation des valeurs des paramètres calculés par le modèle sur un échantillon de données observées qui n'a pas servi au calage. Sans cette étape, il n'y a aucune assurance que le modèle n'est autre chose qu'une représentation d'un jeu unique de conditions. On utilise généralement comme critère de validation le même critère que pour le calage bien qu'il soit aussi possible de faire appel à un (ou plusieurs) autre(s) critère(s).

5.2.2 Description générale du modèle ANSWERS

Le modèle ANSWERS – pour ***A****real* ***N****onpoint* ***S****ource* ***W****atershed* ***E****nvironmental* ***R****esponse* ***S****imulation* (Beasley, 82) – est un modèle conceptuel qui a été développé pour simuler le comportement d'un bassin versant à l'échelle événementielle. Les modèles conceptuels tentnte de simuler les processus physiques. La version d'ANSWERS associée au SIG GRASS utilise les informations géographiques pour générer les variables d'entrées. C'est cette version qui a été utilisée pour le bassin versant de Voinesti.

Le modèle ANSWERS est composé d'un modèle hydrologique et d'un modèle d'érosion du sol qui utilisent l'ensemble d'équations suivant :

Modèle hydrologique

1. Equations de continuité

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \qquad \text{Eq 1}$$

où I représente le flux entrant dans la maille étudiée provenant soit des précipitations, soit des mailles contiguës, Q le flux sortant, S le volume d'eau stocké dans une maille et t le temps

2. Surface potentielle de stockage (Huggins et Monke)

$$\boldsymbol{DEP = HU \cdot RC \cdot \left(\frac{H}{HU}\right)^{1/RC}} \qquad \text{Eq 2}$$

où DEP est le volume d'eau stocké (mm), H la hauteur au-dessus de la maille (mm), HU la hauteur au-dessus du microrelief maximum (mm), RC un paramètre de forme qui caractérise la fréquence et l'intensité de la rugosité.

3. Infiltration (Holtan, Overton)

$$\boldsymbol{FMAX = FC + A \cdot \left(\frac{PIV}{TP}\right)^{P}} \qquad \text{Eq 3}$$

où FMAX est la capacité d'infiltration de la surface inondé (mm/h), FC la capacité finale d'infiltration (mm/h), A l'augmentation de la capacité d'infiltration au dessus de la capacité finale d'infiltration (mm/h), TP la porosité totale (%), PIV le volume d'eau qui peut être stocké à l'intérieur du volume de contrôle (mm) et P l'exposant d'infiltration

4. Drainage $\boldsymbol{DR = FC \cdot \left(1 - \frac{PIV}{GWC}\right)^{3}}$ Eq 4

où DR représente le taux de drainage de la zone de contrôle, GWG le contenu en eau gravitaire de la zone de contrôle (TP-FP), FP la capacité au champ.

Modèle d'érosion

5. Erosion par la pluie (Meyer et Wischmeier)

$$DETR = 0{,}108 \cdot C \cdot K \cdot A_i \cdot R_2 \qquad \text{Eq 5}$$

où DETR représente la détachabilité (kg/mn), C le coefficient cultural et d'occupation du sol, K le facteur d'érodibilité du sol, A_i l'accroissement de la surface (m²), R l'intensité des pluies par intervalles de temps (mm/mn)

6. Erosion par ruissellement

$$\boldsymbol{DETF = 0{,}9 \cdot C \cdot K \cdot A_i \cdot SL \cdot Q} \qquad \text{Eq 6}$$

où DETF est le taux de détachement par ruissellement (kg/mn), Q le flux par unité de section (m²/mn), SL la pente (%)

7. Capacité de transport

$$TF = 161 \cdot SL \cdot Q^{0,5} \quad si \quad Q \leq 0{,}046 \left(m^2/mn\right)$$
$$TF = 161 \cdot SL \cdot Q^{2} \quad si \quad Q > 0{,}046 \left(m^2/mn\right)$$
Eq 7

où TF le taux potentiel de transport de sédiments (kg/mn m)

Le modèle ANSWERS adopte quelques hypothèses simplificatrices :

En ce qui concerne le calcul de l'infiltration et du drainage de subsurface :

- Le drainage de subsurface commence quand l'humidité du sol dépasse la capacité au champ.
- Le régime permanent est atteint quand le sol est saturé, c'est-à-dire quand l'intensité d'infiltration égale la conductivité hydraulique à saturation
- Le coefficient de drainage subsuperficiel est égal au coefficient d'infiltration permanent quand le sol est saturé

En ce qui concerne le calcul d'érosion du sol :

- Au début de la pluie les particules sont arrachées effet «splash » parce qu'il n'y a pas de ruissellement ; quand le ruissellement devient plus important les particules sont détachées par ruissellement ;
- La granulométrie des particules détachées est la même que celle du sol soumis à l'érosion ;
- L'érosion par la pluie est indépendante de la capacité de transport du courant ;
- L'érosion par le courant n'est possible que si la capacité de transport le permet ;
- Les sédiments déposés dans une maille sont considérés comme appartenant de nouveau à la surface du sol et ils nécessitent la même quantité d'énergie pour être remobilisés ;
- Dépôt et érosion ne peuvent pas se produire en même temps pour la même particule ;
- Il n'y a pas d'érosion souterraine ;
- L'érosion dans le réseau hydrographique (de type ravine, rigoles, cours d'eau) n'est pas prise en compte ;
- Le taux de sédimentation est proportionnel à la vitesse de la chute.

5.2.3 Variables d'ANSWERS

Les variables fournies par le SIG, ainsi que les variables physiques d'état (végétation, sol) et hydrologiques (précipitations ; l'évapotranspiration est négligée à l'échelle de l'événement) sont les seules variables nécessaires à ANSWERS pour estimer le ruissellement et l'érosion du sol sur l'ensemble du bassin versant (Figure 1).

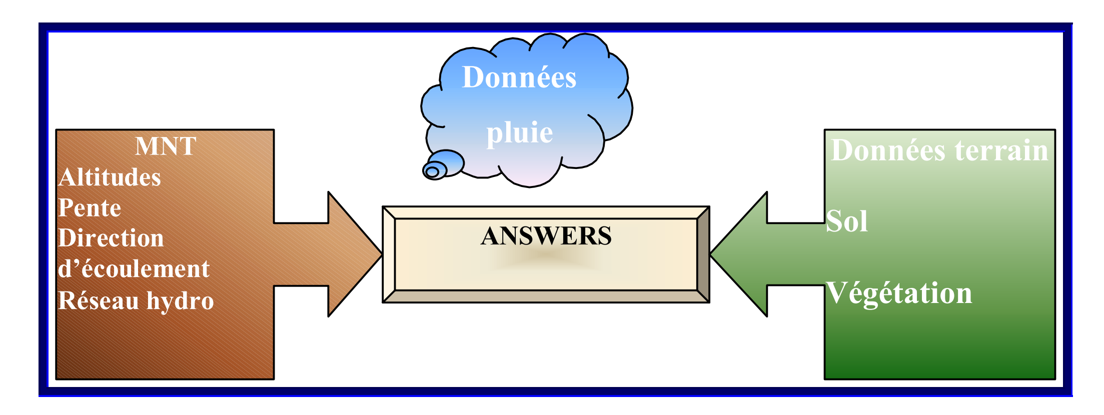


Figure 1 Variables d'entrée dans le modèle ANSWERS

5.2.3.1 MNT

La version d'ANSWERS associée au SIG GRASS utilise certaines informations géographiques pour générer les variables d'entrée : la carte d'altitude, la carte de la végétation et la carte de types des sols. Le traitement de l'information spatialisée a été fait avec le logiciel ArcView (voir le paragraphe précédant).

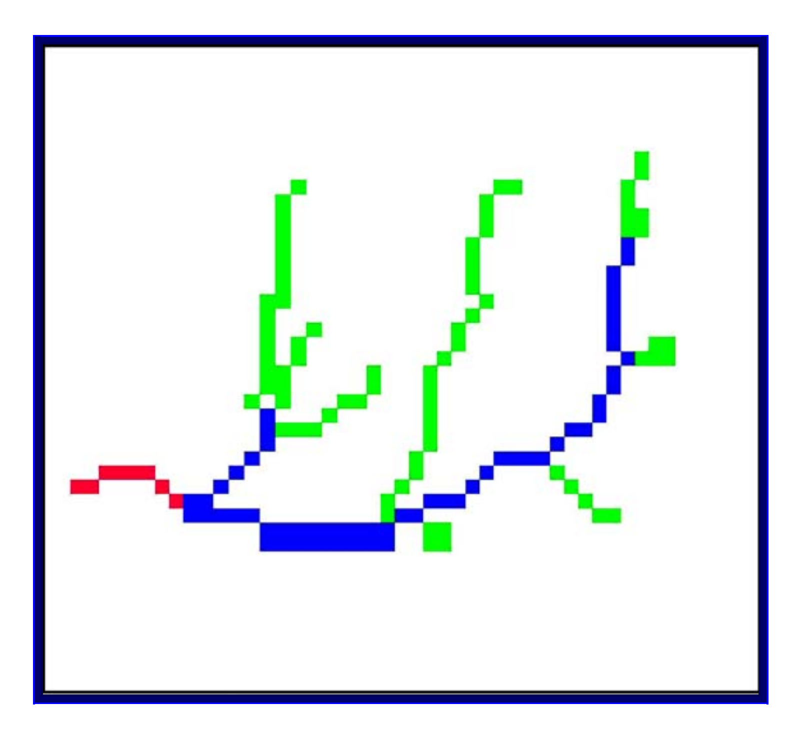


Figure 2 Le schéma du réseau hydrographique de Voinesti obtenu avec GRASS (mailles de 25 m)

Toutes les cartes utilisent le même système de coordonnées géographiques (système UTM), ce qui permet une superposition des cellules. GRASS permet d'acquérir directement les cartes de pentes, direction d'écoulement, réseau hydrographique, mais nous sommes obligées d'utiliser de reconstruire ces cartes parce que le modèle ANSWERS est limité à nombre total de 1700 mailles. Pour respecter cette limitation, il faut agréger l'information issue d'ArcView et passer d'une résolution de 5 mètres à une résolution de 25 mètres.

Cette modification n'altère pas notablement la superficie du bassin versant. Par contre on observe une modification importante du réseau hydrographique recalculé par GRASS par rapport à celui établi sous ArcView (voir la carte présentée dans le chapitre 5.1). La Figure 2 donne la nouvelle représentation du réseau hydrographique obtenu avec GRASS. La ramification du réseau est significativement réduite. A chaque maille est attribuée un code selon la manière dont un canal s'écoule dans le suivant (1 pour le canal en vert, 2 pour le canal en bleu et 3 pour le canal en rouge).

Des utilitaires spéciaux (r.fill.dir) permettent dans GRASS de corriger les éventuelles dépressions parasites du MNT.

5.2.3.2 Données de pluies

ANSWERS nécessite des fichiers de précipitations formatés en deux colonnes, la première contient le temps en minute et la deuxième contient l'intensité de la pluie en mm/h. Le pas de temps peut être fixe ou variable. Nous utilisons les fichiers préparés avec ACROPOLE. Le nombre total de valeurs de pluie ne doit pas dépasser 35. Pour les événements qui dépassent cette limite, nous avons adopté un pas de temps variable.

ANSWERS offre la possibilité d'utiliser les enregistrements simulatanés de plusieurs pluviographes (jusqu'à 4). Pour cela, il faut fournir les coordonnées (en cordonnées x, y) de ces appareils. Nous n'avons utilisé que le seul pluviographe P3 situé à l'altitude moyenne du bassin, en considérant qu'à l'échelle du bassin versant Voinesti (inférieure à 1 km²) la précipitation est uniformement distribuée.

5.2.3.3 Données de terrain

Sol

Chacune des classes de sol (15 unités à Voinesti) est caractérisée par les paramètres :

- TP – porosité (%), FC – capacité finale d'infiltration (mm/h) assimilée à la conductivité hydraulique à saturation. Deux types de sol ont été étudiés au chapitre 4 (§4.2), les unités

US8 et US 13. Pour ces deux unités, nous utiliserons les valeurs de la porosité et de la conductivité hydraulique à saturation mesurées et données dans le tableau suivant :

	TP (%)	FC (mm/h)
US8	47	0,77
US13	38	0,19

Pour les autres unités de sol, en fonction de la texture de chaque unité du sol (voir le tableau 1 §3) nous utilisons les valeurs de TP suggérées dans le manuel d'utilisation du modèle. Pour la détermination du paramètre FC, nous avons rapprochés les unités du sol en fonction de leurs textures aux deux unités étudiées et nous avons attribué les valeurs FC de ces deux unités.

- FP – capacité au champ (%) P – coefficient relatif à la décroissance du taux d'infiltration avec l'accroissement de la teneur en eau (sans dimension). Ces paramètres ont été choisis en fonctions de la texture de chaque type de sol selon le manuel d'utilisation d'ANSWERS. La capacité au champ varie de 39% à 74%. Les valeurs de l'exposant de l'équation d'infiltration varient de 0,35 à 0,80.

- DF - profondeur de la zone de contrôle (mm) ; en effet ce paramètre se réfère à la partie du sol qui participe à l'infiltration. En général, DF est égal ou plus petit que la profondeur de l'horizon A. Beasley et Huggins (1982) proposent d'utiliser la moitié de la profondeur de l'horizon A. Les valeurs varient d'une unité à l'autre, en fonction des valeurs de l'horizon A (voir tableau 1, chap. 3)

- ASM – la teneur en eau initiale (%) ; pour chaque événement traité, nous utilisons la valeur de la teneur en eau mesurée dans le jour antérieur.

- K – l'érodibilité du sol (sans dimension) a été établi en fonction du type du sol. Les valeurs retenues sont celles proposées par Luca et al. en 1978 pour les sols de la Roumanie.

Végétation (état de surface)

Pour chaque catégorie de végétation identifiée dans le bassin versant, ANSWERS demande les paramètres suivants :

- PIT – potentiel d'interception (mm), PER – taux de couverture (%) ; PIT a été choisi entre 0 mm pour le sol nu et 2 mm pour la forêt (d'après le manuel d'utilisation). PER est calculé avec ArcView (voir §5.1).

- RC – paramètre qui caractérise la surface de chaque type d'occupation du sol (sans dimension). En effet il décrit la fréquence et l'importance de la rugosité ; selon le manuel d'utilisation d'ANSWERS ce paramètre varie entre 0,25 et 0,80. La plus grande valeur est attribuée à un sol travaillé à la charrue à soc. HU – hauteur au-dessous du microrelief maximum (mm). Ce paramètre caractérise l'amplitude locale du microrelief. Il varie de 38 mm pour la steppe herbacée et pour la prairie, à 76 mm pour le champ cultivé.
- n- coefficient de rugosité de Manning qui varie de 0,1 pour un sol nu à 0,15 pour la forêt.
- C – coefficient cultural et d'occupation du sol qui est une combinaison directe des facteurs C (couvert végétal) et P (méthode conservationiste) de l'USLE. Il a été estimé selon les recommandations de Motoc et varie de 0,15 pour le champ cultivé jusqu'à 0,7 pour le verger.

5.2.4 *Résultats*

Nous avons sélectionné 14 événements pour calage et 13 pour la validation du modèle. L'événement du 02/08/97 au 04/08/97 a été divisé en deux parties, mais seule la première partie (le 02/08/97) a pu être simulée.

5.2.4.1 Calage du modèle

Les résultats de cette première simulation sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1 Lame écoulée simulée

Date	Pbr (mm)	Lame écoulée (mm) simulée	Lame écoulée (mm) mesurée
25/05/97	8,5	0,89	1,86
04/06/97	27	17,9	7,4
05/06/97	18,09	17,07	12,18
11/06/97	12,2	3,93	10,29
24/06/97	34,1	23,2	19,62
25/06/97	22,8	16,29	16,3
01/07/97	8,8	5,43	0,22
13/07/97	10,3	2,45	0,65
31/07/97	12	3,04	10,18
05/08/97	15,6	8,64	13,02
08/08/97	40,4	36,53	40
09/08/97	10	4,68	3,16
30/05/98	5,8	1,13	1,51
31/05/98	2,7	0,104	2,49
Moyenne	16,31	10,09	9,92
Coef. corrélation		0,90	
Coef. détermination		0,80	

Même si le coefficient de corrélation a une valeur de 0,90, ces résultats ne sont pas satisfaisants. De Roo et al. (1989) et Ritter (1992) indiquent que les paramètres les plus sensibles sont les paramètres concernant l'infiltration (FC et DF) et l'humidité initiale du sol (ASM).

La capacité finale d'infiltration (FC) ne peut pas être modifiée. Cette valeur est assimilée à la conductivité à la saturation et sa valeur a été déterminée dans le chapitre 4.2. Une analyse de l'équation d'infiltration du sol utilisée par le modèle (Eq. 3) montre que le coefficient P peut être corrélé avec le taux de diminution de la capacité d'infiltration : le rapport PIV/TP est inférieur à l'unité et une augmentation du coefficient P suppose une diminution de la capacité d'infiltration.

L'analyse du sol réalisée au chapitre 4.2 montre que le sol a un comportement de sol argileux. Les particules d'argiles qui se trouvent dans les sols du bassin versant de Voinesti ont la propriété de retenir l'eau infiltrée ; le sol devient rapidement saturé et l'eau en excès s'écoule à la surface du versant. En tenant compte des ces résultats, nous avons augementé la valeur du coefficient P de 0,55 à 0,8 (0,9).

En ce qui concerne le paramètre DF, nous avons utilisé comme valeur de départ, la moitié de la profondeur de l'horizon A. Dans le manuel d'utilisation du modèle, nous avons trouvé que le paramètre DF peut varier de 0,25 à 0,75 de la profondeur de l'horizon A. Dans les observations de terrain que nous l'avons fait sur le sol du bassin versant de Voinesti nous avons observé que ce type de sol présente une forte érosion du sol et il arrive que l'horizon A soit très faible, voire inexistant. C'est pour cela que nous avons réduit la valeur du paramètre DF à 0,25 de la profondeur de l'horizon A.

La valeur ASM ne peut pas être modifiée parce que nous utilisons les valeurs d'humidité mesurées. Mais nous proposons de corriger cette valeur en considérant la valeur est pondérée sur une profondeur égale à DF.

Avec ces hypothèses, les résultats de simulations s'améliorent nettement. Le coefficient de corrélation et le coefficient de détermination augmentent de 0,90 à 0,94, respectivement de 0,80 à 0,87.

Le critère Nash utilisé dans le calage prend la valeur de 0,87.

Le graphique de la Figure 3 montre un nuage de points groupés. Les valeurs ne s'éloignent pas significativement de la première bissectrice, sauf pour deux événements qui sont nettement au dessus (04/06/97 et 01/07/97).

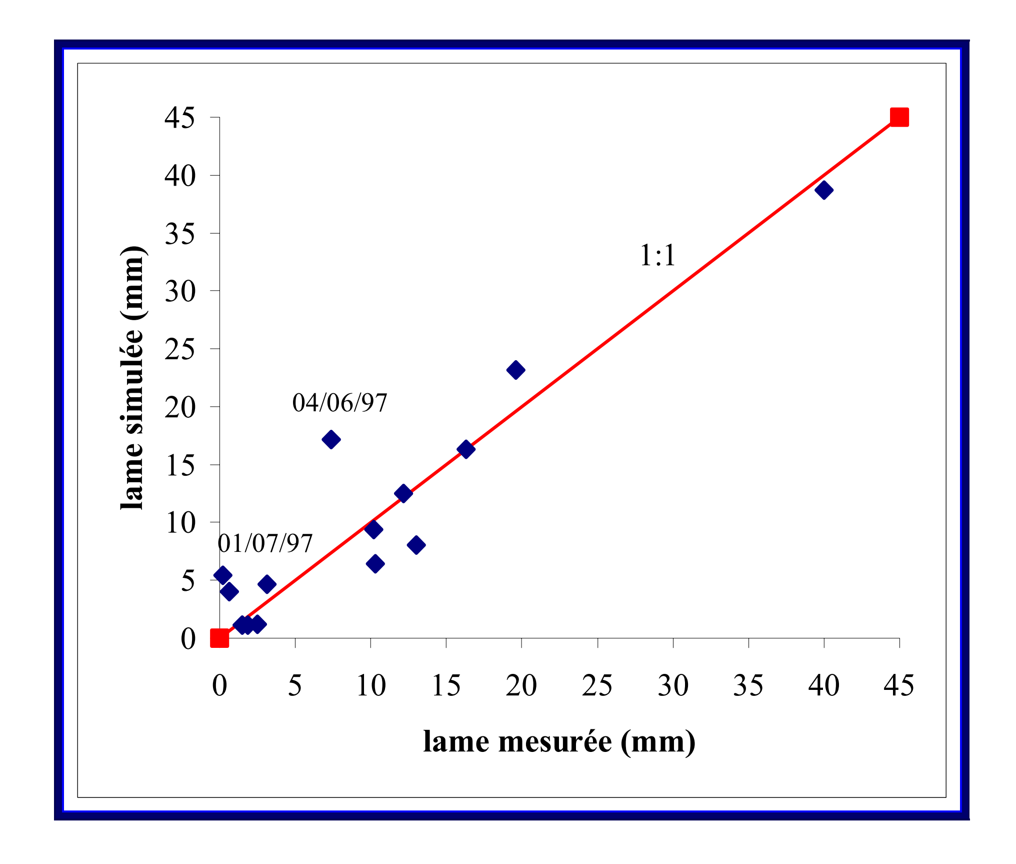


Figure 3 Qualité d'ajustement du modèle

Il y a deux façons d'interpréter cette anomalie : soit le modèle est responsable de cette surestimation, soit les valeurs de la teneur en eau présentent des erreurs. Cette deuxième hypothèse est vraisemblable parce que les mesures sont faite d'une manière assez approximative.

5.2.4.2 Validation

Afin de tester la validité du modèle, il a été appliqué aux événements qui n'ont pas servi au calage avec les mêmes paramètres. Pour évaluer la qualité des reconstitutions, nous avons étudié successivement les lames écoulées et le débit maximal.

Sur la Figure 4, nous présentons les lames écoulées calculées par le modèle et les mêmes variables observées. Le nuage de point (lames écoulées simulées et mesurées) atteste une bonne corrélation entre les deux variables. Le coefficient Nash a même une valeur supérieure à celle qui de l'étape de calage (0,96 par rapport à 0,86). Le coefficient de corrélation passe de 0,94 à 0,98.

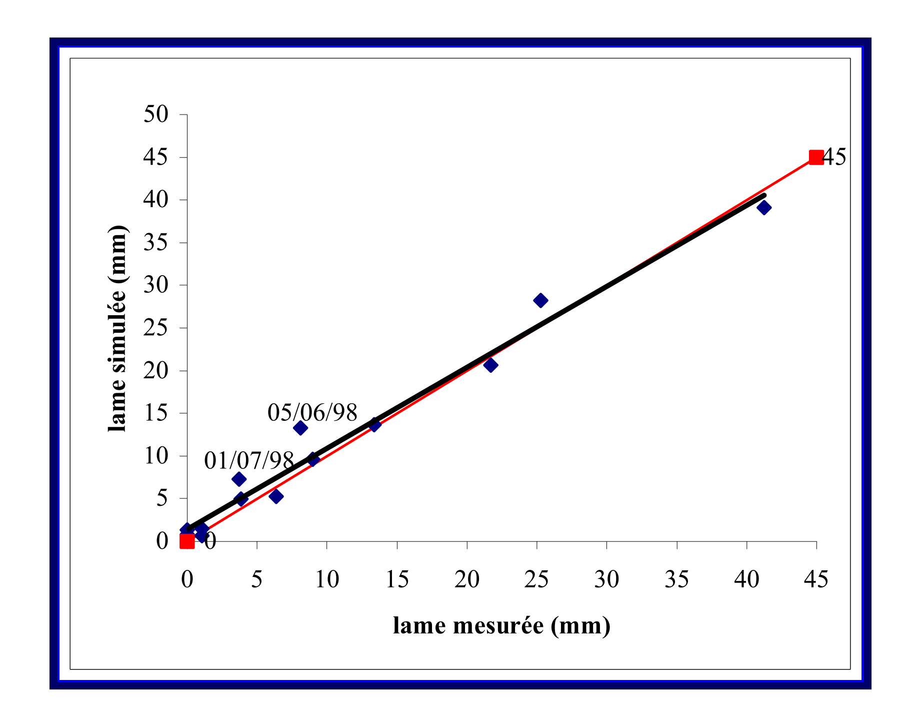


Figure 4 Comparaison des lames écoulées simulées et mesurées utilisées pour la validation (en rouge la première bissectrice et en noir la droite de régression linéaire)

Le coefficient de détermination est de 97,3%. La pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression ne sont pas significativement différentes de 1, respectivement de 0.

La comparaison des débits de pointe donne un coefficient de détermination de 96,68%. L'ordonnée à l'origine de la droite de régression n'est pas significativement différente de 0 mais sa pente est visiblement différente de 1.

Ces résultats montrent que les lames écoulées sont bien reconstituées à l'échelle du bassin versant, mais le modèle sous-estime les débits de pointe pour les fortes crues.

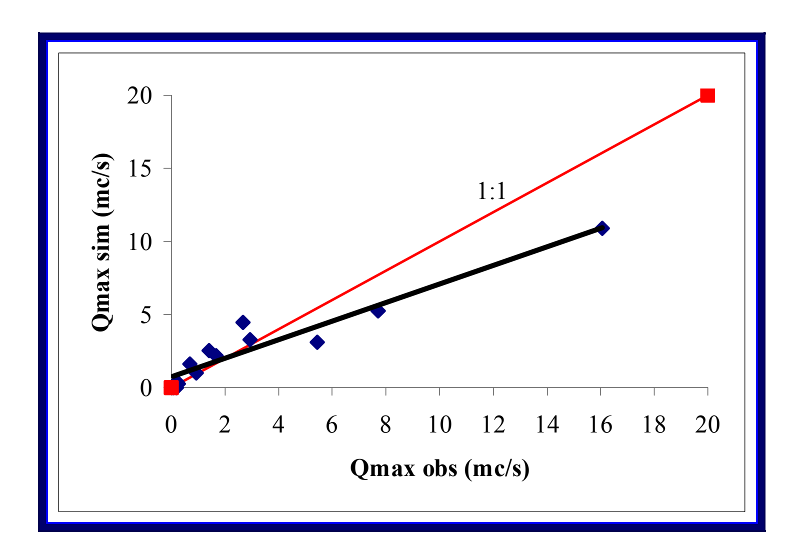


Figure 5 Validation du modèle. Comparaison entre les débits de pointe (simulés et observés)

5.2.5 Discussion

Les figures suivantes (Figure 6) présentent les hydrogrammes simulés et observés sur le bassin pour les deux événements du 08/08/97 et du 10/06/97.

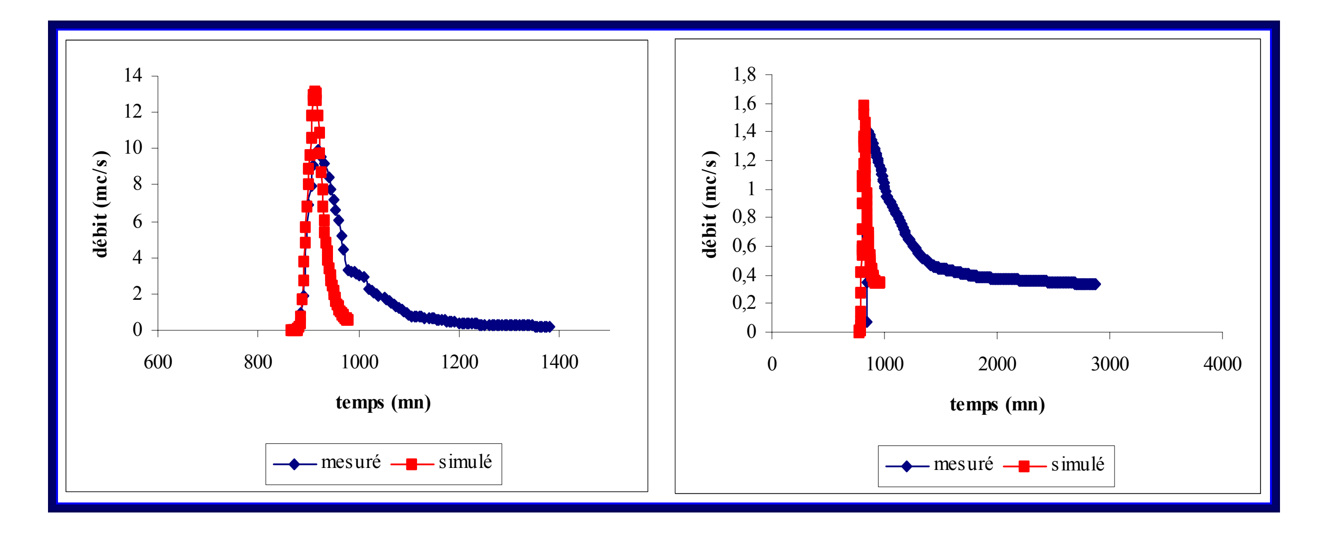


Figure 6 Crues du 08/08/97 et du 10/06/97 observées (trait bleu) et simulées (trait rouge) sur le bassin versant deVoinesti

Dans les deux cas le modèle simule la première phase de la crue mais pas la seconde ce qui explique la sous-estimation de la lame écoulée calculée. L'écoulement modélisé s'arrête à la fin de la pluie ce qui signifie que le modèle ne simule pas la phase de la vidange du bassin versant.

Sur la Figure 7 sont présentés, deux autres hydrogrammes caractéristiques. Le modèle donne l'impression qu'il peut simuler des hydrogrammes complexes mais d'une manière peu satisfaisante.

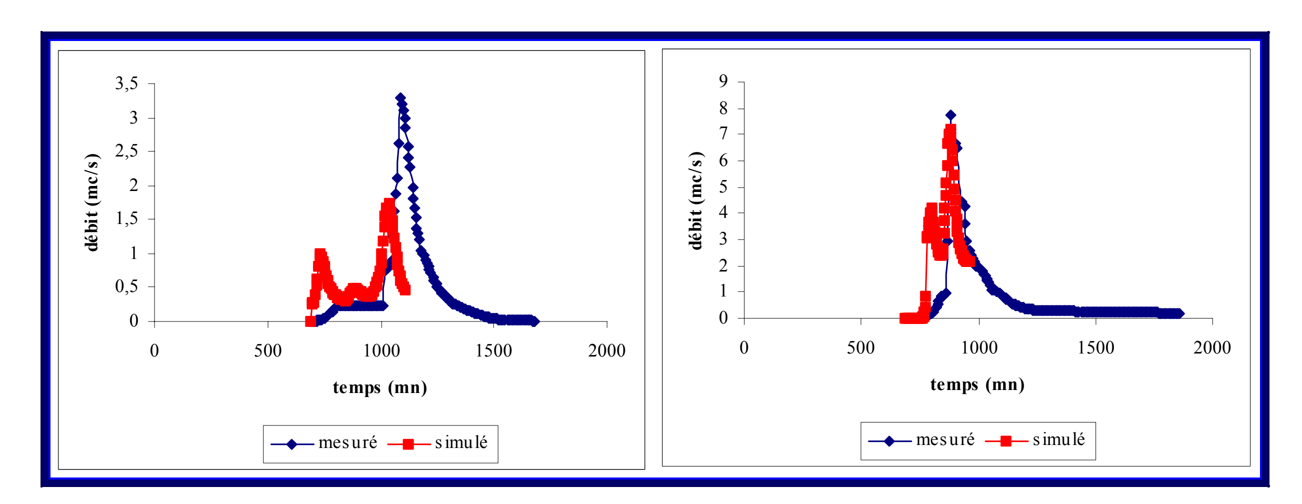


Figure 7 Crues du 05/06/97 et du 08/06/98 observées (trait bleu) et simulées (trait rouge) sur le bassin versant de Voinesti

Dans le premier cas (05/06/97) le modèle surestime le volume écoulé au cours de la première phase de la crue et le deuxième pic est nettement inférieur au pic réel. Dans le deuxième cas (08/06/98) la lame calculée par le modèle est proche de la lame mesurée mais la forme de l'hydrogramme simulé est assez différente de celle de l'hydrogramme observé. Cette situation est due à la forme du hyétogramme de la pluie qui présente une allure assez irrégulière (avec deux pics de forte intensité).

On remarque que généralement les hydrogrammes simulés présentent un décalage de quelques minutes à une demi-heure approximativement. Deux causes peuvent être envisagées : soit le modèle est responsable du décalage, soit les données présentent des erreurs. Généralement les pluies possèdent une forte intensité à leur début et le bassin versant étudié répond d'une manière rapide, avec un temps de montée court. Il est donc plus probable qu'il y a des erreurs dans les données venant de l'horloge du limnigraphe ou de dérives de temps non corrigées lors du dépouillement.

Le principal problème d'application du modèle ANSWERS est qu'il exige de nombreuses données qui ne sont pas toujours disponibles. De plus, il est limité à un petit nombre d'intervalles de pluie, ce ne permet pas de traiter des averses longues (supérieures à 8 heures).

5.2.6 Pertes en sol

Le modèle ANSWERS permet de calculer les pertes en sol pour chaque événement. En l'absence d'observations directes relatives à cette variable, on ne peut pas caler les paramètres du modèle. On se contentera donc dans la suite de commenter les résultats et on utilisera la prévision du modèle comme une estimation de l'ordre de grandeur de l'érosion.

Dans le tableau suivant nous donnons quelques paramètres statistiques de la série d'érosion du sol simulée par le modèle. La quantité moyenne érodée est de 4,45 t/ha. La valeur maximale est de 19,79 t/ha et la valeur minimale est nulle.

Tableau 2 Caractéristiques statistiques de la série calculée d'érosion du sol. Relation érosion-lame écoulée définie par le coefficient de corrélation et le coefficient de détermination

Moyenne	4,45 (t/ha)
Coef. Détermination	0,89 (a=1,88; b=2,16)
Coef. Corrélation	0,95
Maximum	19,79 (t/ha) (08/08/97)
Minimum	0,00 (t/ha) (18/06/98)

Dans le graphique présenté de la Figure 8, nous observons une bonne corrélation entre les lames écoulées mesurées et les pertes en sol, le coefficient de corrélation étant de 0,95. Nous observons également une relation linéaire entre les deux variables donnée par l'équation E=1,88Le+2,16. Le coefficient de détermination de cette régression linéaire est de 0,89 (Tableau 2).

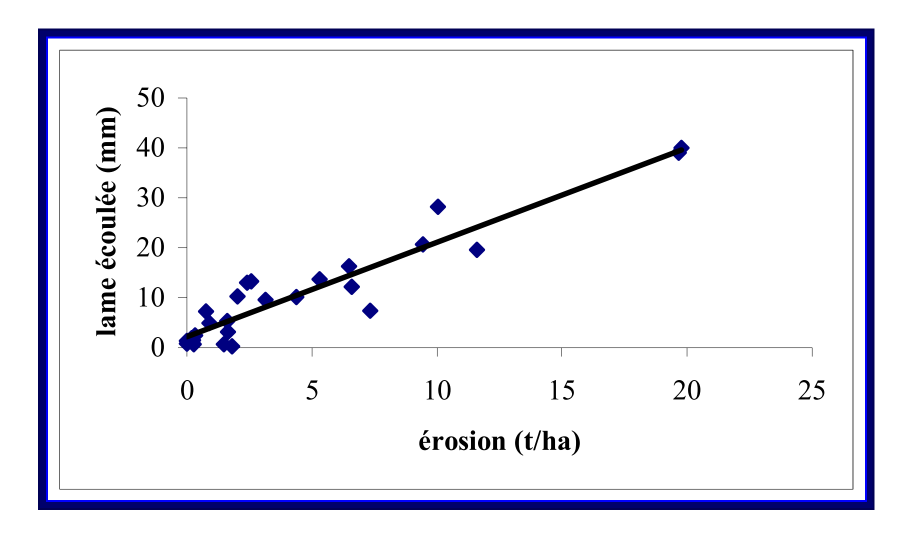


Figure 8. Relation perte en sol – lame écoulée

5.3 LE MODELE TOPOG

5.3.1 Historique du modèle

Le modèle TOPOG (O'Loughlin E.M, 86) est un modèle distribué à base physique réalisé par un groupe de chercheurs du CSIRO australien*. Le développement de TOPOG a débuté en 1987 et il n'est pas encore achevé.

Le premier objectif de ce modèle était d'apporter des éléments de compréhension aux problèmes de salinisation qui affectent une grande partie des terres irriguées d'Australie. Aujourd'hui, il tente de simuler plusieurs aspects de la circulation de l'eau dans un bassin versant : l'écoulement superficiel, l'écoulement de l'eau dans le sol, les échanges avec l'atmosphère, le transfert de solutés, le transport de sédiments.

La principale « force » de TOPOG réside dans un modèle très sophistiqué d'analyse du terrain, qui tente de décrire de manière réaliste la topographie. Il utilise un maillage basé sur les courbes de niveau et les lignes de plus grande pente, en considérant que l'eau suit la ligne de plus grande pente sur un bassin versant naturel. Ce maillage est supposé constituer des entités « naturelles », chacune d'elle étant considérée comme un volume de contrôle.

TOPOG est un assemblage de plus de 30 programmes écrits en FORTRAN et en C. L'ensemble des programmes TOPOG a fonctionné au départ sur des stations UNIX. Il existe aujourd'hui une version pour les plates-formes LINUX. C'est cette dernière version qui a été utilisée dans notre étude.

5.3.2 Applications du modèle TOPOG

Le modèle TOPOG a surtout été utilisé pour des applications sur des bassins versants ayant des superficies inférieures au km², mais on trouve aussi quelques résultats sur des bassins de plus de 10 km². Les applications décrites dans la littérature concernent essentiellement des bassins versants à forte pentes, souvent forestiers, étudiés pendant de longues périodes. Les études ont principalement porté sur la qualité de l'eau, l'érosion (Prosser I. et al., 96 ; Prosser I. et al., 95 ; Montgomery D. et al., 94), le transfert de solutés (Dawes W.R., 93), les modélisations écohydrologiques, la modélisation de la croissance d'une forêt (Vertessy R.A. et al. , 96), l'impact de l'augmentation du taux de dioxyde de carbone à l'échelle d'un bassin versant (Hatton T.J. et al. , 92), l'analyse de terrain et l'influence de la topographie de terrain

---

* Cooperatives Research Centre for Catchment Hydrology

sur la simulation des processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant (O'Loughlin E.M, 86; Vertessy R. et al., 94; O'Loughlin E. M, 90)

5.3.3 L'organisation de TOPOG et ses possibilités

TOPOG est un modèle spatialisé à base physique, composé de trois modules principaux :

- Un module d'analyse de terrain (qui est le point fort de ce modèle) ;
- Un module de simulation ;
- Un module d'utilitaire.

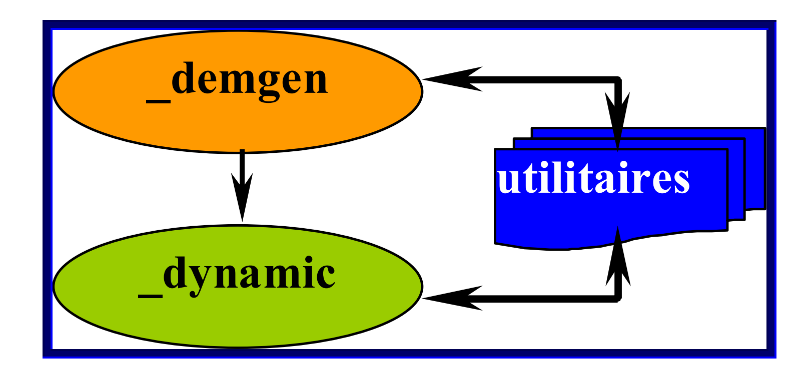


Figure 1 Le schéma général de TOPOG

Le module « analyse de terrain » (_demgen et _element) présente l'avantage de l'utilisation d'un maillage basé sur les courbes de niveau et les lignes de plus grande pente. Ceci permet la représentation implicite des zones convergentes et divergentes sur le bassin versant étudié.

Le module « utilitaires » comporte beaucoup de programmes qui permettent de calculer, par exemple, la variabilité spatiale du sol et de la végétation (topog_overlay) ou de construire différentes tables du sol en utilisant le programme _soil. Ce module offre la possibilité de visualiser les différents fichiers spatialisés avec topog_display ou des différents fichiers résultats avec topog_chart. **TOPOG** peut aussi générer des données manquantes dans les fichiers climatiques par topog_climate.

Le module de simulation (_dynamic) permet :

- La représentation de l'écoulement dans la zone souterraine de trois manières différentes
    - par la résolution de l'équation de Richards à une dimension pour l'écoulement vertical non saturé, l'écoulement saturé étant représenté par la loi de Darcy et le gradient hydraulique étant considéré égal au gradient topographique ;
    - par l'utilisation d'un schéma de Runge-Kutta pour l'écoulement vertical l'écoulement saturé étant représenté par la loi de Darcy ;

    - par l'utilisation d'un schéma analogue à celui de TOPMODEL considérant que la conductivité hydraulique d'un sol décroît avec la profondeur et que l'écoulement saturé est décrit par la loi de Darcy.
- La représentation du ruissellement suivant trois modalités :
    - l'écoulement est directement transféré à l'exutoire du bassin versant à chaque pas de temps ;
    - en mode cascade, le ruissellement est transféré à la maille aval à chaque pas de temps ;
    - le ruissellement est transféré selon le principe de l'onde cinématique.
- La représentation de l'évapotranspiration par une équation de Penman-Monteith et un schéma de Ritchie pour une résolution identique à celle de TOPMODEL.
- La modélisation de l'érosion du sol, soit par l'équation d'Engelund et Hansen, soit par la théorie de Yangs.
- L'utilisation de différents formats d'entrée pour les chroniques climatiques selon que la simulation est continue ou événementielle.
- La représentation de la variabilité spatiale de la végétation et du sol.

5.3.4 Application du modèle au bassin versant de Voinesti

5.3.4.1 Variables du modèle TOPOG

Les variables de terrain (MNT), ainsi que les variables physiques d'état (végétation, sol), hydrologiques (précipitation) et climatiques (radiation, déficit de la pression de vapeur, températures minimale et maximale) sont les variables utilisés par TOPOG pour estimer le ruissellement et l'érosion du sol à l'échelle du bassin versant.

Le MNT

Le modèle TOPOG ne nécessite pas le géoréférencement des données spatialisées.

La procédure d'analyse de terrain utilisée par TOPOG est similaire à celle du modèle TAPES (***T****errain* ***A****nalysis* ***P****rograms for the* ***E****nvironmental* ***S****ciences*) développée par Moore et al. en 1988. Le bassin versant est divisé en éléments irréguliers interconnectés selon le concept de lignes de courant. Les lignes de courant entre deux ou plusieurs courbes de niveau sont approchées par les lignes de plus grande pente. Elles sont calculées en utilisant deux critères (Moore I.D. et al., 91) : la distance minimale entre deux courbes de niveau

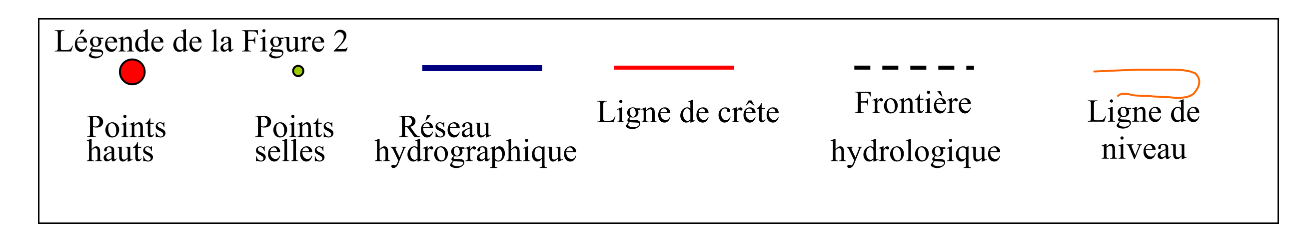
consécutives et le principe d'orthogonalité (les lignes de courant sont perpendiculaires aux courbes de niveau).

Le module d'analyse de terrain utilise les types de données suivantes :

- des points cotés ;
- ou des courbes de niveau.

Nous sommes partis des points de «vertex » définis sous ArcView (auxquels nous avons rajouté la cordonnée Z d'altitude à l'aide d'un script ArcView). Ils doivent être mis au format exigé par TOPOG (3f10.2).

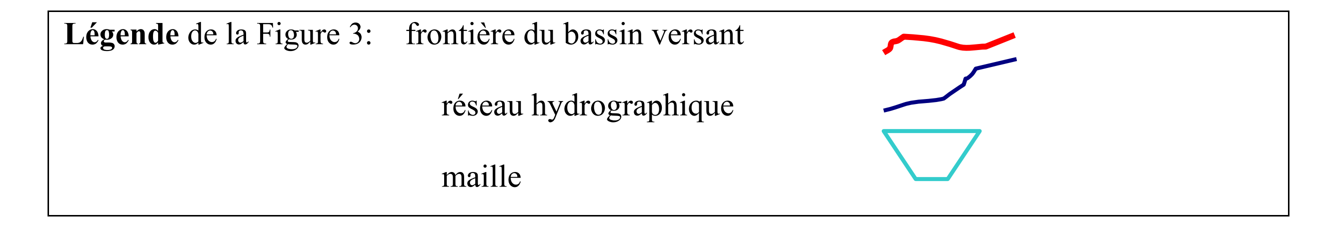
Figure 2 Détermination de la frontière hydrologique du bassin versant et des lignes de crête pour le bassin versant de Voinesti



La première étape est de construire à partir de ces données une grille carrée des altitudes sur le bassin versant, c'est à dire un MNT « normal ».

Dans la deuxième étape, l'utilisateur doit spécifier l'équidistance des lignes de niveau (2 mètres dans ce cas). Puis le modèle calcule les courbes de niveau qui serviront de base au maillage en utilisant une interpolation par des courbes spline.

Figure 3 Détermination des mailles sur le bassin versant Voinesti



La troisième étape est la délimitation de la frontière du bassin versant. Elle est définie par deux points, un point de départ et l'exutoire, et par une succession de points hauts et de points selles (Figure 3). Cette succession de point est construite manuellement ou automatiquement à l'aide du programme _mkbdy.

Le modèle calcule la frontière du bassin versant comme une succession de segments perpendiculaires aux courbes de niveau situées entre les points indiqués. TOPOG détermine les lignes de crête à partir des confluences du réseau hydrographique jusqu'aux points hauts correspondants.

Toutes ces tâches étant accomplies, le modèle calcule ensuite les lignes de plus grande pente qui délimitent les mailles utilisées par le modèle hydrologique. On aboutit à ce stade pour le bassin de Voinesti à un total de 4444 mailles.

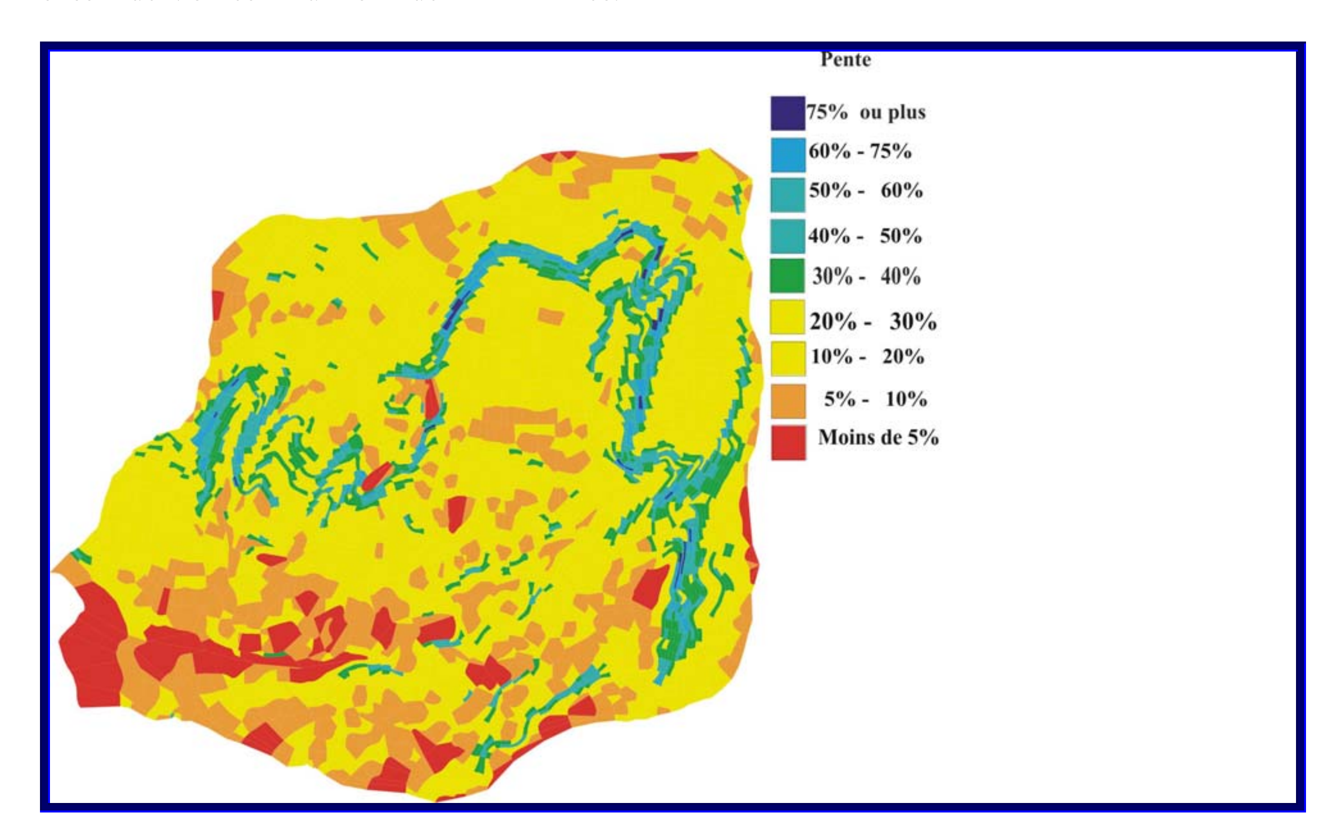


Figure 4 Représentation de la pente

Finalement le module d'analyse de terrain calcule les caractéristiques de chaque maille : la pente (Figure 4), le surface, le longueur et l'aspect. A partir de cette carte d'attributs, le modèle calcule pour chaque élément la radiation solaire potentielle en été et en hiver.

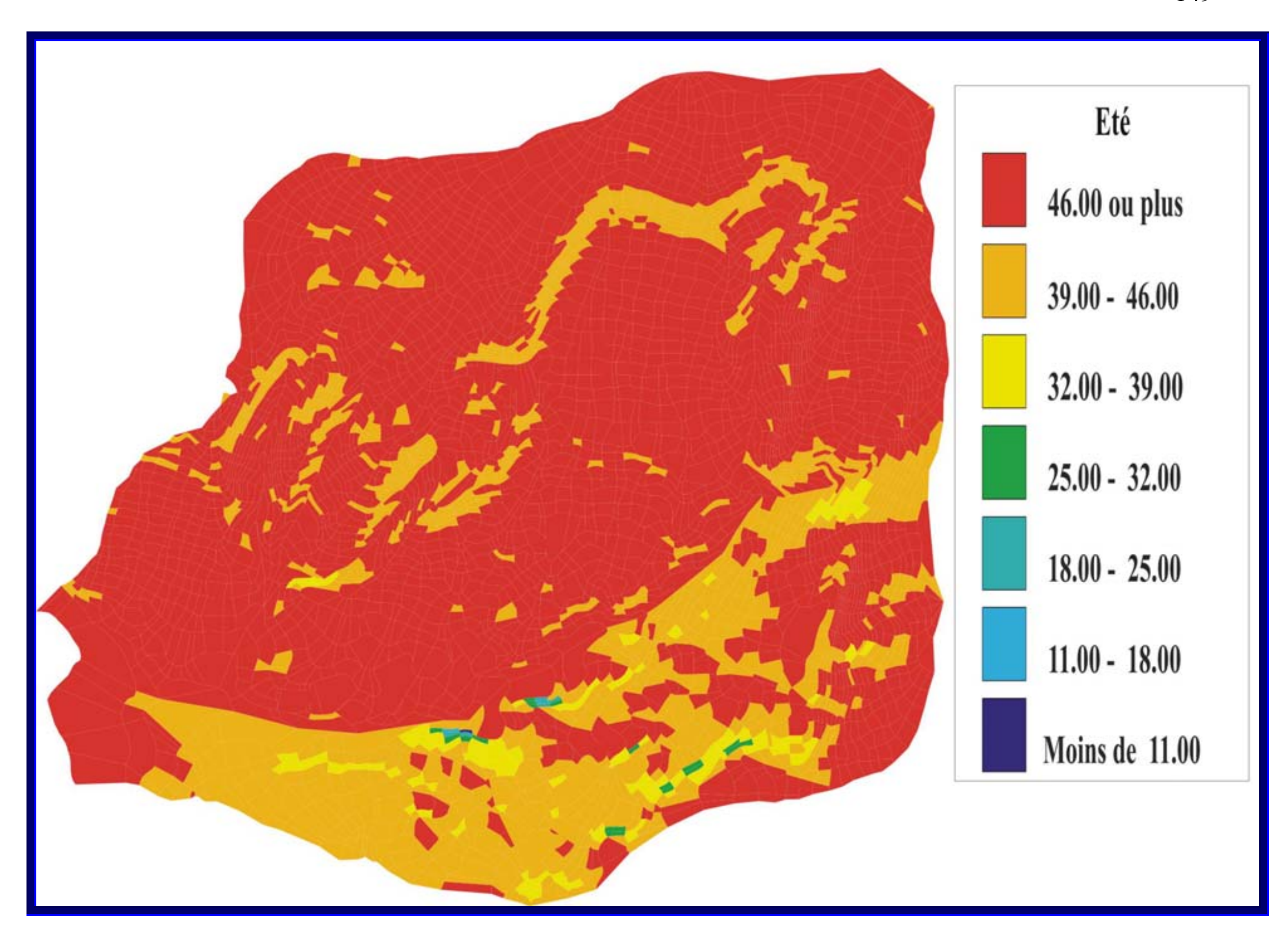


Figure 5 Représentation de la radiation calculée par TOPOG (les valeurs de la légende sont en kJ/m².jour)

Sur la Figure 5, nous donnons un exemple de carte réalisé par le module d'analyse de terrain de TOPOG. Il s'agit de la radiation solaire sur la surface du bassin versant Voinesti pendant la période d'été. Nous observons que sur la plus grande partie du bassin versant la radiation solaire est comprise entre 39 et 46 kJ/m².jour à l'exception de quelques zones où elle est inférieure.

<u>**Préparation des données climatiques et hydrologiques**</u>

La préparation des données climatiques et hydrologiques varie en fonction du pas de temps utilisé dans la simulation (continue ou événementielle). Quelque soit le pas de temps utilisé, il faut créer un fichier ayant l'extension *.climate qui contient les données suivantes :

- pour une simulation en continu les données nécessaires sont : la date en jour julien, la température maximale (^{o}C), la température minimale (^{o}C), le déficit moyen de la pression de vapeur (mbar), la pluie journalière (mm), la radiation solaire (kJ/m².jour)
- pour une simulation à l'échelle événementielle nous n'avons besoin que du pas de temps fixe et de la pluie en millimètres.

Toutes ces données existent pour le bassin de Voinesti, mais elles doivent être mises au format exigé par TOPOG.

Le sol

Le modèle TOPOG permet la représentation de l'écoulement vertical dans la zone non saturée en utilisant un schéma analogue à celui de TOPMODEL (Ambroise, 98). Le module est appelé SBM (***S**implified **B**ucket **M**odel*). Il considère une seule couche du sol dans lequel la conductivité à saturation décroît avec la profondeur en suivant une loi exponentielle. Cette équation s'écrit :

$$k_0 = k_s \cdot exp\left(\frac{f}{z}\right) \qquad \textbf{Eq. 1}$$

où **:**

k_s – conductivité à saturation à la surface du terrain

z - profondeur

$f = m \cdot D_q$ avec m un paramètre de décroissance de la conductivité avec la profondeur et D_q le déficit en eau avant la saturation.

L'utilisation du schéma SBM permet de quantifier le flux de sub-surface qui sort de chaque maille vers la maille aval. Il est calculé par l'expression :

$$q = k_0 \cdot tan(\beta) \cdot exp\left(\frac{S_i}{m}\right) \qquad \textbf{Eq. 2}$$

où :

tan (β) – la pente de terrain

k_s – la conductivité hydraulique de chaque maille

S_i – le déficit de saturation de la maille

Le terme exp(S_i/m) varie dans l'intervalle (0,1). Si m est égal à zéro, l'équation 2 devient : $q = k_s \cdot tan(\beta)$.

Le sol du bassin versant Voinesti a été divisé en deux catégories en utilisant les mêmes simplifications que lors de la modélisation avec ANSWERS. La première catégorie regroupe tous les sols ayant la même texture que l'unité du sol US 8. La deuxième catégorie comprend les sols qui correspond du point de vue textural à l'unité du sol US 13. Cette simplification est due au fait que nous n'avons pas de données d'observation sur

toutes les unités de sol du bassin. Pour simplifier, les sols regroupés autour de l'unité US 8 sont appelés sol 1 et les autres sol 2.

Les caractéristiques du sol sont décrites par un fichier (*.nodes) qui représentent en fait un profil de sol. Dans le schéma SBM que nous nous proposons d'utiliser pour la modélisation, ce fichier doit contenir deux informations : la première se réfère à la profondeur du sol exprimée en mètres (deux nœuds seulement sont nécessaires) et la deuxième est relative au type de sol. Pour les deux types de sol nous utilisons un profil d'un mètre de profondeur parce que, d'une part, jusqu'à cette profondeur nous avons des observations et, d'autre part, à partir de cette profondeur commence la couche d'argile considérée imperméable.

Pour chaque type de sol ainsi caractérisé, le module _soil calcule les conductivités hydrauliques en fonction de la profondeur du sol en utilisant les variables suivantes :

- la réserve d'emmagasinement considérée comme le déficit à saturation ($\boldsymbol{S}_i$) ; cette variable est égale à la différence entre la teneur en eau à saturation (θ_s) et la teneur en eau résiduelle (θ_r) – les teneurs en eau sont exprimées en m^3/m^3 ;
- le paramètre ***m*** de décroissance de la conductivité hydraulique ; le manuel d'utilisation du modèle suggère un écart de variation compris entre 0,2 et 20 ;
- la conductivité à la saturation $\boldsymbol{k}_s$ (m/jour) ;
- le potentiel de pression, ***y***, correspondant au point de fleutrissement (m).

Pour un premier essai, nous avons utilisé les valeurs suivantes :

Spécification	**Sol 1**	**Sol 2**
θ_s (m^3/m^3)	0,57	0,41
θ_r (m^3/m^3)	0,1	0,1
$\boldsymbol{S}_i$	0,47	0,31
$\boldsymbol{k}_s$ (m/jour)	0,01728	0,0045
m	0,2	0,2
y (m)	-150	-150

Sur les figures suivantes (Figure 6 et Figure 7) sont représentées dans le même graphique les valeurs de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur du sol.

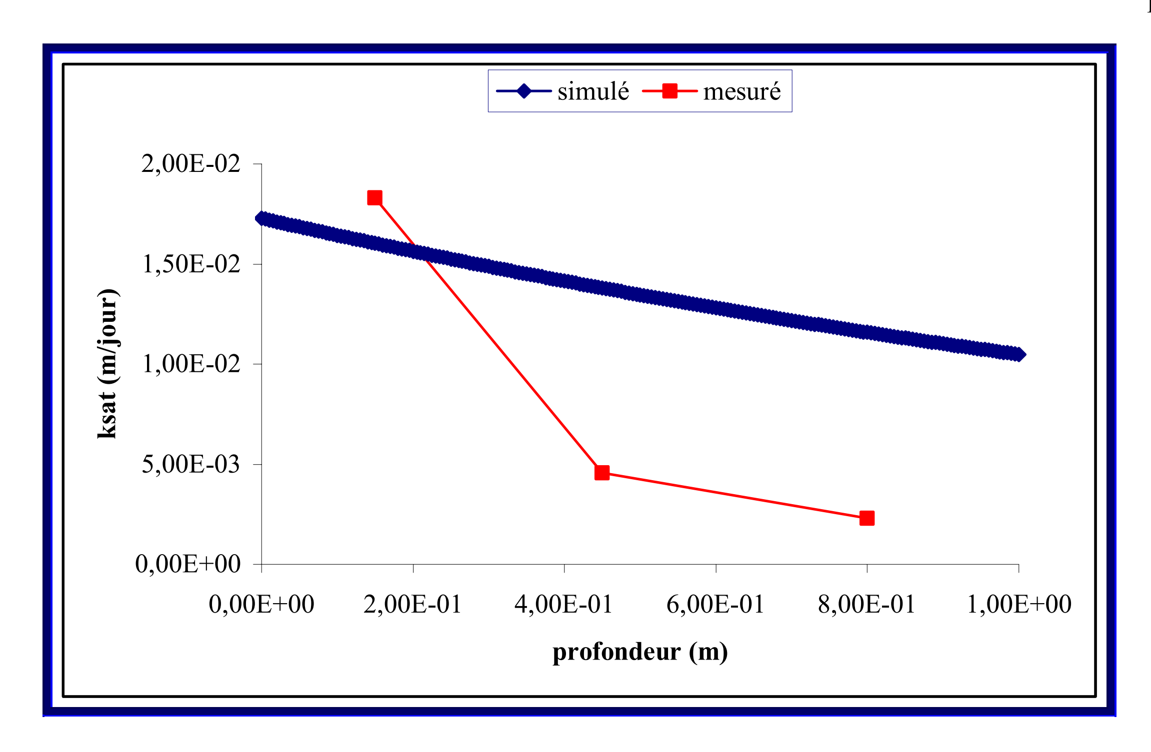


Figure 6 Relation conductivité hydraulique – profondeur du sol 1

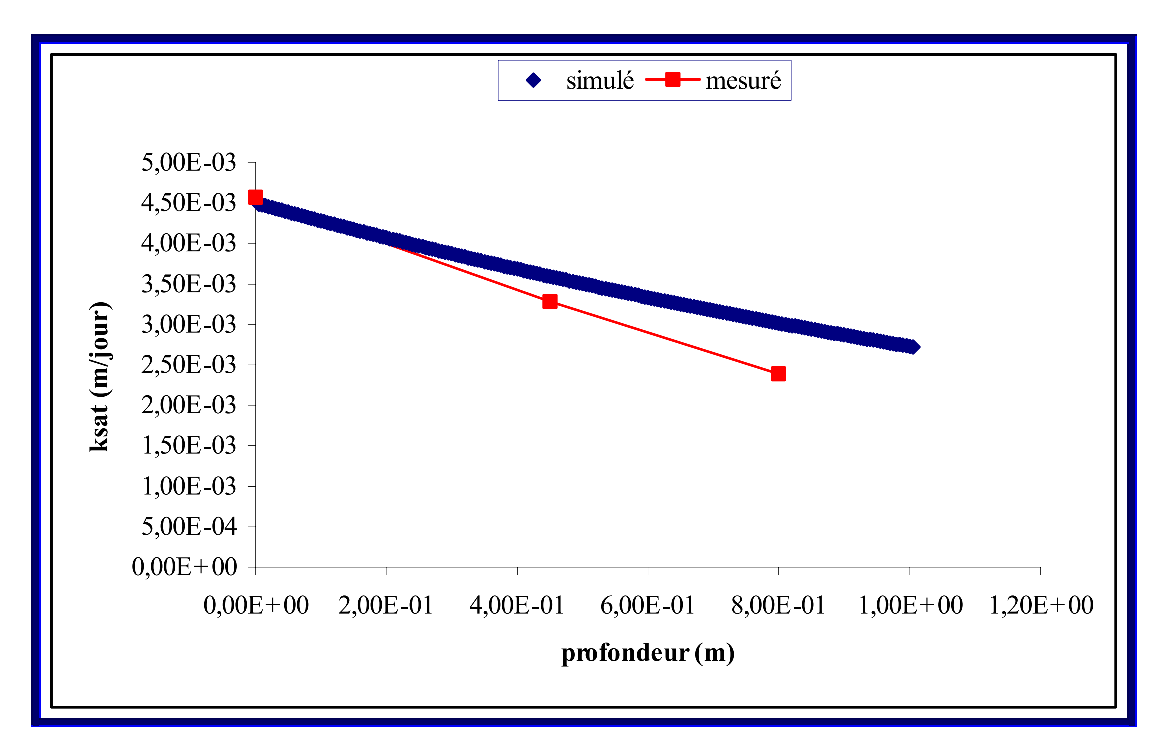


Figure 7 Relation conductivité hydraulique – profondeur du sol 2

Pour le jeu de variables proposé, nous observons que la relation conductivité hydraulique – profondeur du sol est mieux représentée pour le sol 2 que pour le sol 1. En réalité le sol 1 présente une courbe plus pentue dans sa première partie, ce qui signifie un drainage rapide suivi d'un drainage lent, alors que la courbe simulée montre un drainage lent pour tout le profil. Par contre, pour le sol 2, la relation conductivité hydraulique – profondeur est bien représentée par le modèle sauf dans la partie inférieure.

Ces représentations de la figure ci-dessus ne sont pas satisfaisantes. Le test suivant a consisté dans la modification du paramètre ***m***, sachant que nous ne pouvons pas intervenir sur les autres parce qu'ils sont mesurés.

Pour le sol 1, la valeur du paramètre m est augmentée de 0,2 à 5 et pour l'autre sol de 0,2 à 1,7.

Les changements entraînés par cette modification ont été représentés sur la Figure 8.

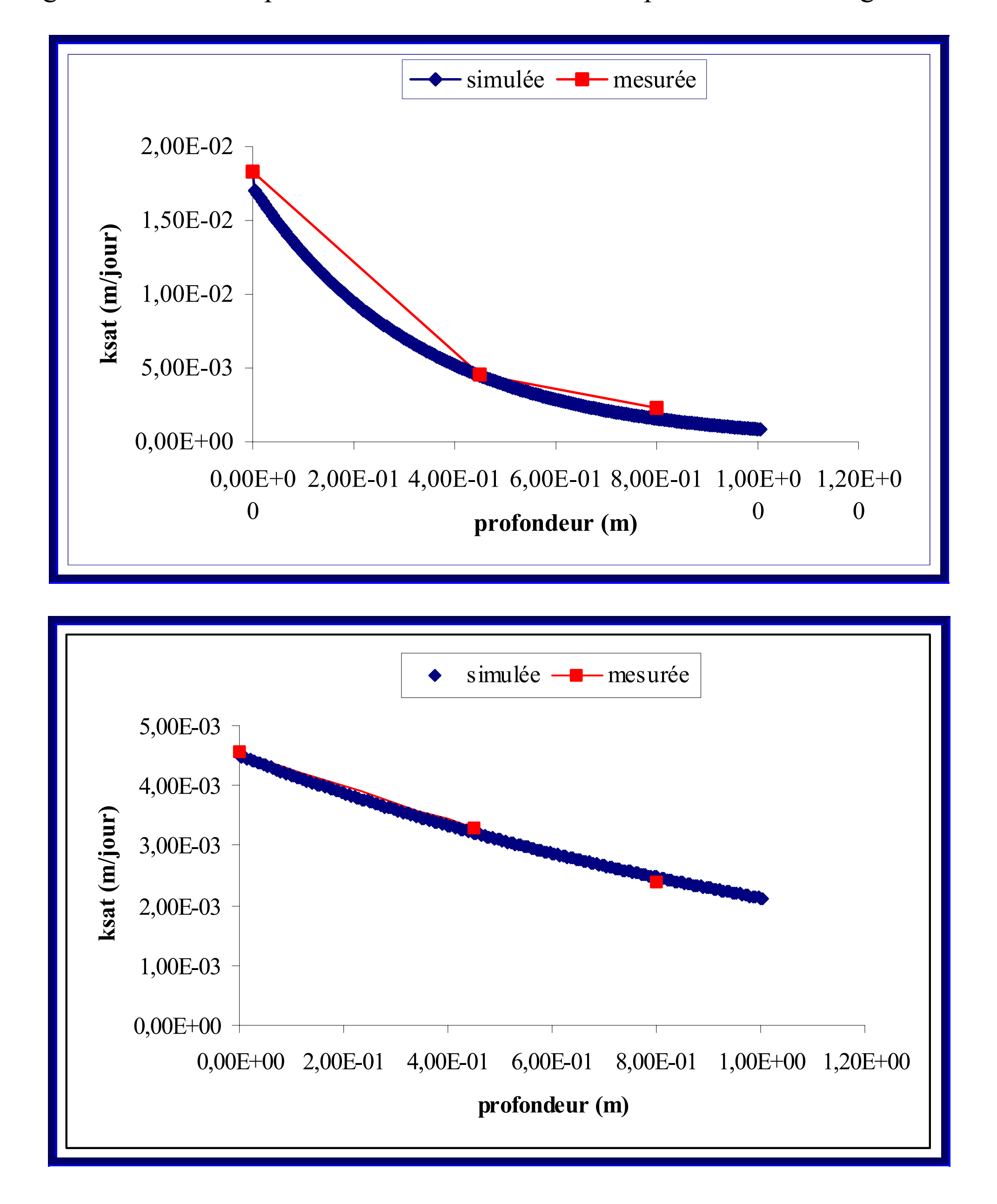


Figure 8 Comparaison de la relation conductivité hydraulique – profondeur après la modification du paramètre m pour le sol 1 (en haut) et pour le sol 2 (en bas)

Nous observons qu'après la modification du paramètre m la relation conductivité – profondeur est sensiblement améliorée. Pour le sol 2 les deux courbes sont pratiquement superposées ce qui indique une bonne corrélation entre les deux séries de valeurs. Pour le sol

1, la relation conductivité – profondeur simulée prend l'allure de celle mesurée. La différence observée dans la première partie de la courbe est due sans doute à l'absence de mesures plus denses de la conductivité sur le profil (avec trois points de mesure nous ne pouvons pas avoir une tendance exponentielle).

Après cette modification, nous estimons que la simulation de la conductivité hydraulique du sol est satisfaisante et nous passons au paramètre suivant qui intervient dans la modélisation du ruissellement.

La végétation

Le modèle TOOPOG simule l'évapotranspiration et l'érosion du sol et pour cela il demande les caractéristiques de chaque type de végétation présent dans le bassin versant.

Ces paramètres qui sont nombreux se réfèrent à : l'albédo du sol et de la végétation, le coefficient d'interception, la capacité d'absorption racinaire, la pente de la courbe température-pression de vapeur, le potentiel, la profondeur maximale d'enracinement, la résistance aérodynamique de la plante et du sol, la fraction du sol exposé, la distance entre le centre de gravité de la plante et la surface du sol. Pour tous ces paramètres nous avons utilisé les valeurs suggérées dans le manuel d'utilisation de TOPOG. A cause à cette multitude de paramètres nous avons réduit à deux le nombre de classes de végétation, forêt et prairie, en admettant que la steppe herbacée fonctionne de la même manière que la prairie et que les autres types de végétation couvrent des superficies négligeables par rapport aux deux classes choisies.

5.3.4.2 Modélisation

Une fois le maillage décrivant le bassin versant achevé et la détermination des paramètres d'état conclue, nous pouvons passer à la modélisation hydrologique proprement dite.

TOPOG considère que l'écoulement dans la zone non saturée n'est que vertical et nous avons choisi l'option d'une relation de type TopModel. L'écoulement latéral dans la zone saturée est exprimé par la loi de Darcy. Ce schéma permet de s'affranchir d'une prise en compte des caractéristiques hydrodynamiques complètes du sol, mais ne décrit pas le profil d'humidité.

L'évapotranspiration potentielle est calculée par l'équation de Penman-Monteith et l'évapotranspiration réelle est déduite de la disponibilité en eau dans le profil de sol. Le ruissellement est calculé en terme de bilan d'eau et transféré à la maille aval à chaque pas de temps (modèle de type « cascade ») où il est transféré par une fonction d'onde cinématique (seulement dans le cas de la modélisation en continu).

On peut déjà formuler quelques remarques :

- TOPOG considère chaque maille comme un volume de contrôle et pour chaque d'elle il fonctionne selon l'organigramme de la Figure 9 ; à chaque pas de temps, le modèle calcule le bilan en eau sur ce volume, en fonction des entrées sur la maille (pluie sur la maille, ruissellement et écoulement subsurfacique provenant de l'amont) et des caractéristiques d'état (caractéristiques hydrodynamiques, végétation de la maille). Les sorties sont le ruissellement et l'écoulement subsurfacique vers la maille aval, l' évapotranspiration et l'interception).
- Dans la version de TOPOG dont nous disposons, le réseau hydrographique n'est pas représenté de façon satisfaisante. En effet il est bien calculé (et représenté) sur l'interface graphique, mais il ne participe pas au transfert de l'eau vers l'exutoire.

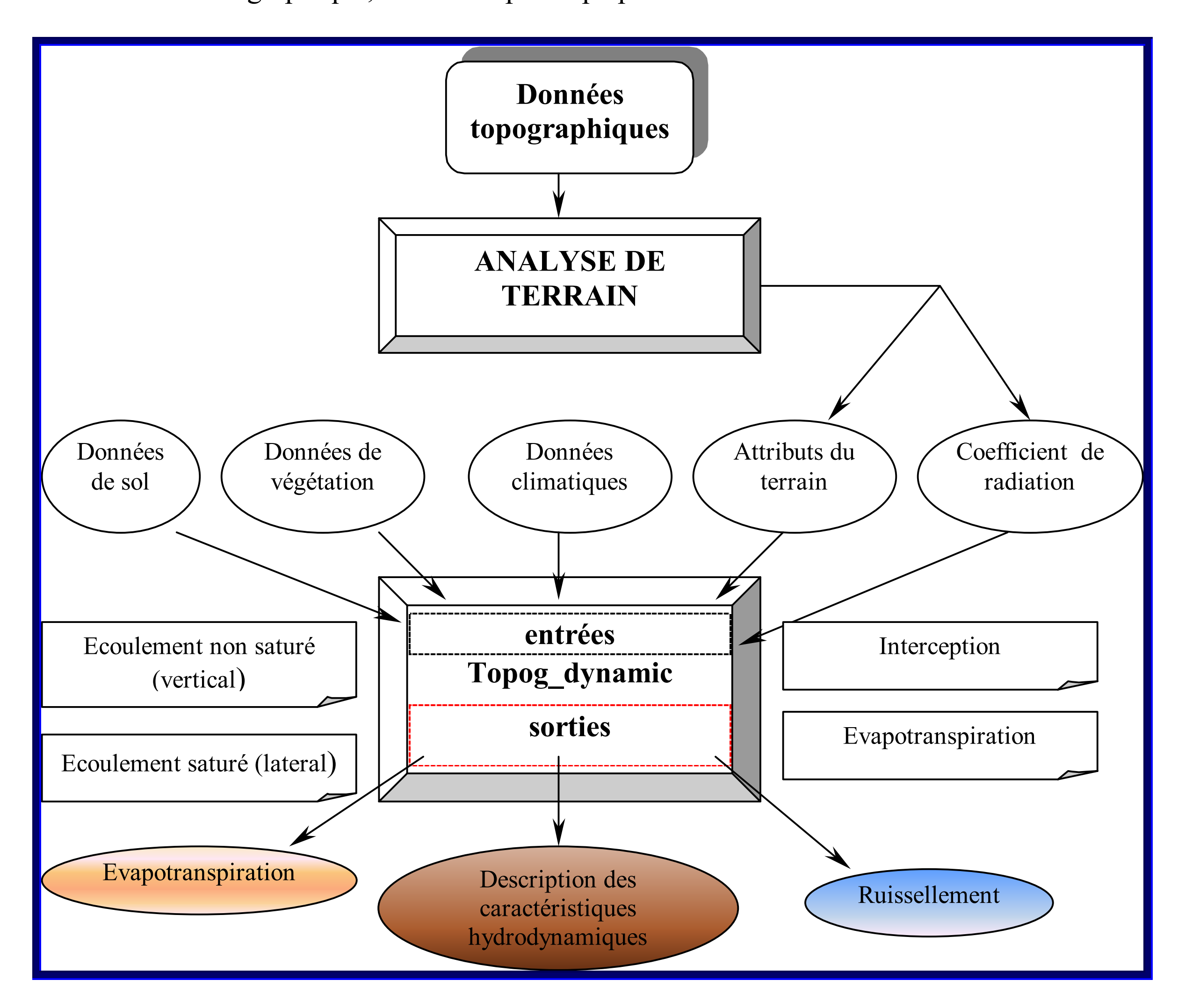


Figure 9 Schéma de fonctionnement du TOPOG

Il nous reste à caler la réponse aux événements pluvieux. Pour une simulation en continu (du premier janvier 1997 au 31 décembre 1998) les résultats sont donnés sur la Figure 10. Nous remarquons que le modèle restitue bien l'importance relative de chaque pic de crue, mais il a

tendance à surestimer les lames écoulées. Il donne aussi la posibilité de reconstituer les lames écoullées pour des événements qui ne sont pas pris en compte dans l'analyse realisée au chapitre 4.

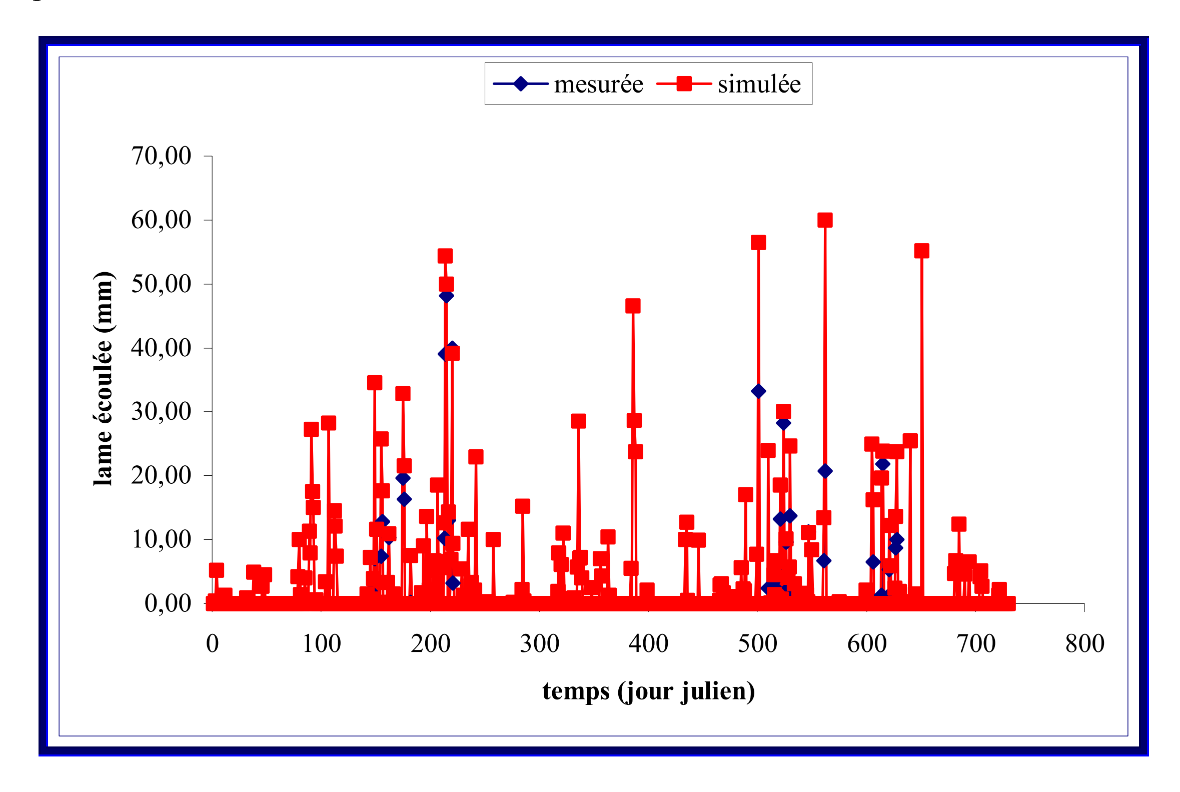


Figure 10 Lames ruisselées simulées et observées

En revenant sur la période analysée au le chapitre 4; c'est-à-dire di 25 mai 1997 au 13 octobre 1997 et du 25 avril 1998 au 13 octobre 1998, nous observons que le modèle surestime dans la plupart des cas les valeurs des lames écoulées.

Le graphique présenté sur la Figure 11 montre un nuage de points situé au dessus de la première bisectrisse pour lequel le modèle surestime les valeurs des lames écoulées. Le coefficient de détermination est d'environ 71% et l'origine de la droite de régression est significativement différent de 0. En revanche, la pente de la droite de régression n'est pas différente de 1.

Les seuls paramètres qui peuvent être modifiés sont les paramètres de la végétation. Nous avons vu dans les paragraphes précédents que pour chaque classe de végétation le schéma d'évapotranspiration emploie 12 paramètres. Compte tenu de la méconnaissance de leurs valeurs réelles (dont certaines varient dans le temps), nous avons renoncé à essayer de caler le modèle en utilisant ces paramètres.

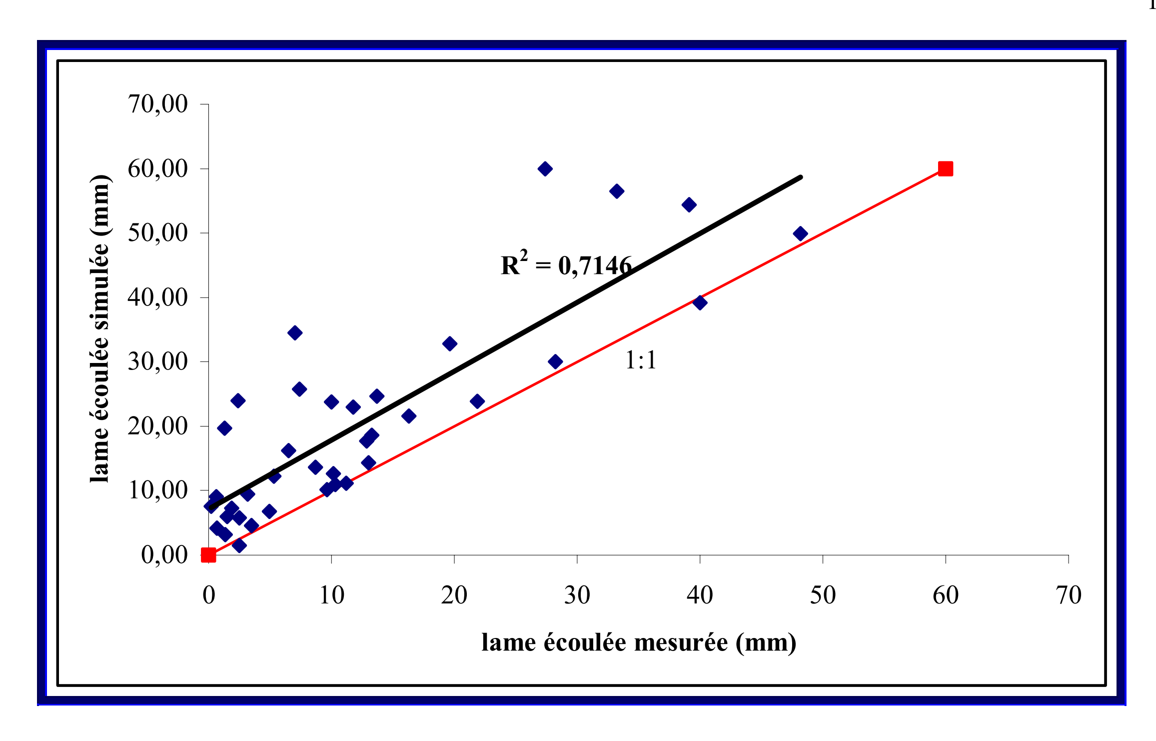


Figure 11 Comparaison des lames écoulées mesurées et simulées

Pour la modélisation à l'échelle événementielle, nous avons choisi le même schéma SBM mais avec l'onde cinématique pour représenter le ruissellement. A chaque pas de temps le modèle calcule la hauteur d'eau sur chaque maille. Cette hauteur est considérée comme la somme de la précipitation et du ruissellemnt provenant des mailles situées à l'amont auxquelles on rajoute l'eau résiduelle. Nous avons choisi pour un premier test toutes les crues de l'année 1997.

Les figures suivantes (Figure 12 et Figure 13) présentent la comparaison entre les lames simulées et mesurées pour deux valeurs différente du coefficient de Manning. Nous observons que le modèle TOPOG a une tendence à sous-estimer les valeurs des lames écoulées et qu' il a du mal à reconstituer les fortes crues. Par exemple, pour la crue du 03/08/97, la valeur estimée est de 16,34 mm, alors que la valeur mesurée est de 40,00 mm. En revanche les lames les plus petites sont bien calculées, l'erreur étant comprise entre 1 et 5%. L'origine de la droite de régression est proche de zéro, mais la pente diffère de la première bissectrice dans sa partie supérieure. Le coefficient de détermination de la droite est de 73% et le coefficient de Nash a une valeur assez faible (0,55).

Nous avons essayé d'améliorer les résultats de la modélisation en modifiant la valeur du coefficient de Manning. Pour cela nous avons augmenté cette valeur à 0,312. Avec cette modification les résultats se présente ainsi :

- le modèle continue de sous-estimer les lames écoulées les plus grandes ;
- le coefficient de détermination augmente et il prend la valeur de 86% ;

- le coefficient de Nash prend la valeur de 0,74 ;
- pour les petites lames écoulées le modèle donne de bons résultats.

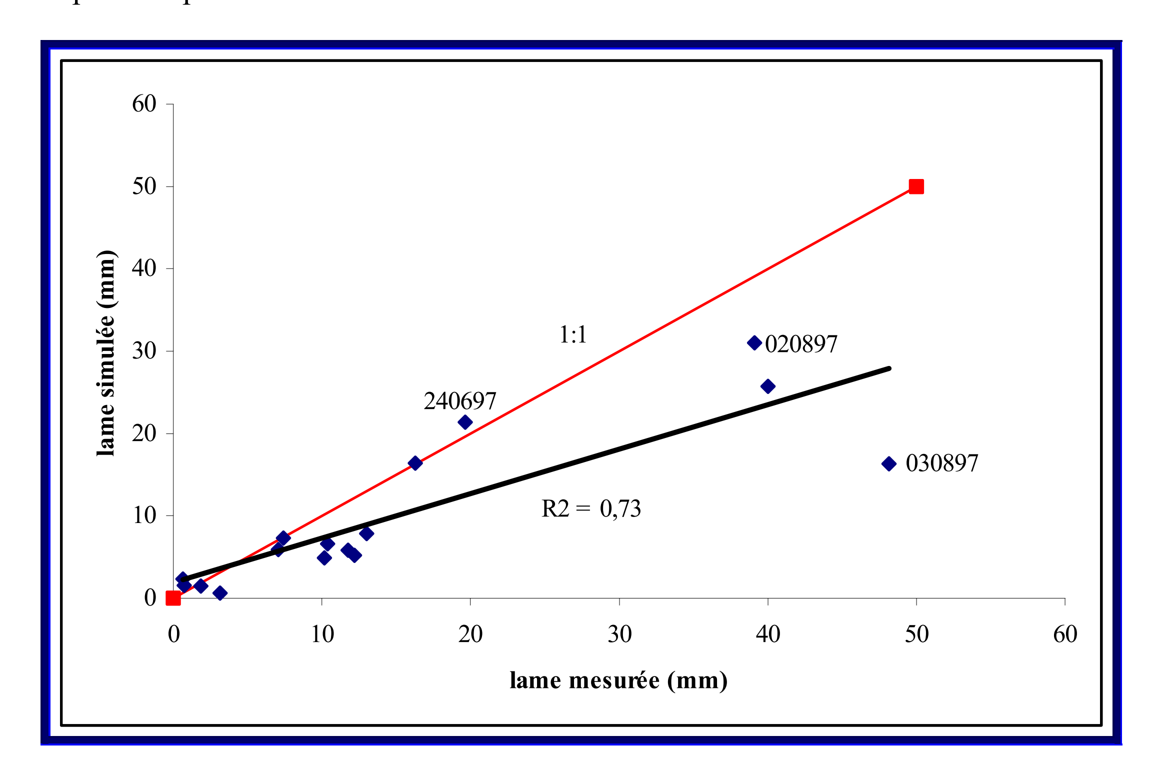
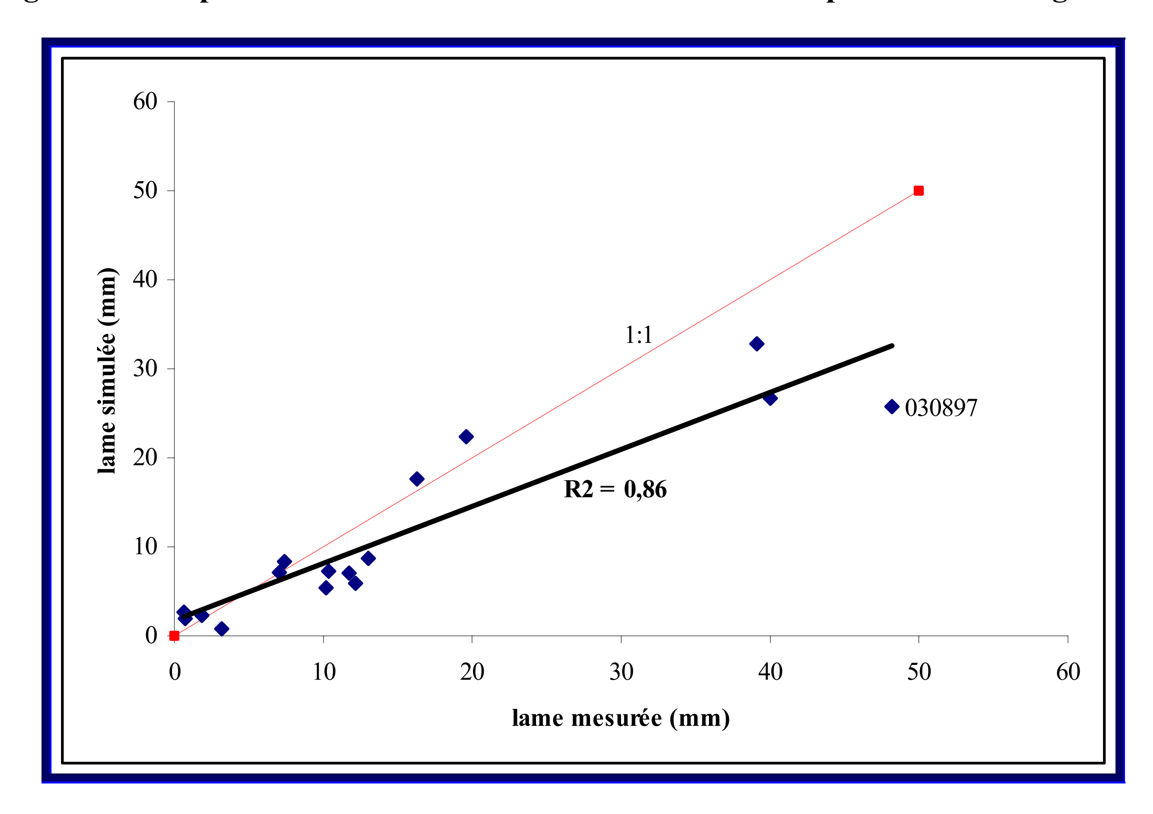


Figure 12 Comparaison entre les lames mesurées et simulées pour un Manning de 0.20



- **Figure 13 Comparaison entre les lames mesurées et simulées pour un Manning de 0.312**

Cette situation n'est toujours pas satisfaisante. Nous avons donc encore augmenté le coefficient de Manning en testant les valeurs suivantes : 0.35, 1,00 et 1,10. Les résultats sont présentés sur la Figure 14. Nous observons que pour des valeurs de Manning de 1,00 et 1,10 les nuages de points sont mieux groupés autour de la droite de régression. Le coefficient de détermination augmente de 0,73 pour le premier essai à 0,89 pour un Manning de 1,00 et 1,1. Les résultats de la simulation pour les valeurs de Manning de 1,10 et 1,00 sont presque les mêmes. Seuls le coefficient de Nash peut être déterminant dans le choix de l'une ou de l'autre valeur. La valeur du critère de Nash pour un Manning de 1,0 est de 0,83 tandis que pour une valeur de Manning de 1,00 ce coefficient passe à 0,929. Même si le modèle continue de sous-estimer la lame écoulée, il simule mieux avec ces nouvelles valeurs les crues les plus fortes.

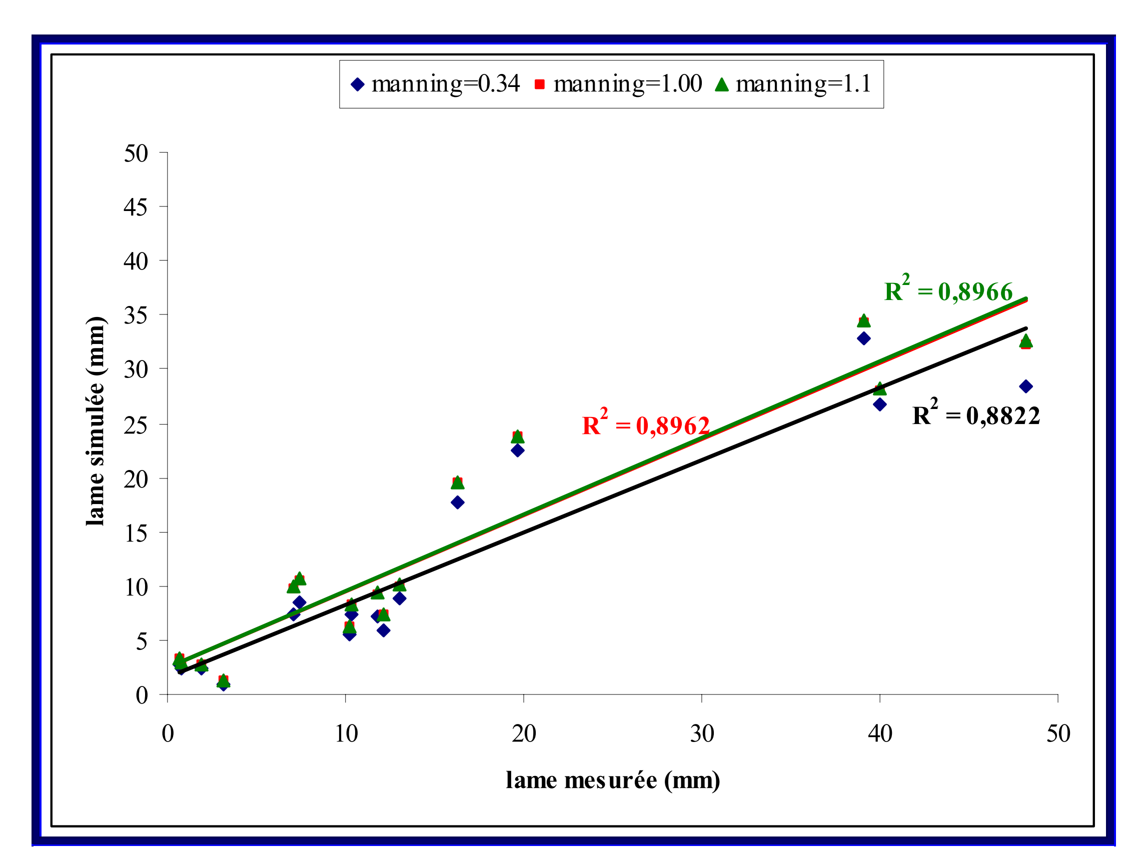


Figure 14 Comparaison des lames mesurées et simulées pour trois valeurs de Manning

En comparant les lames écoulées et calculées par les modèle ANSWERS et TOPOG, nous observons sur la Figure 15 une bonne corrélation entre ces deux séries de valeurs. La droite de régression a son origine proche de la bissectrice et sa pente est pratiquement de 1. Le coefficient de détermination est de 86%.

Dans ces conditions, nous envisageons de conserver la valeur de 1,10 pour le coefficient de Manning. Cette valeur sera testée pour le groupe des données de 1998.

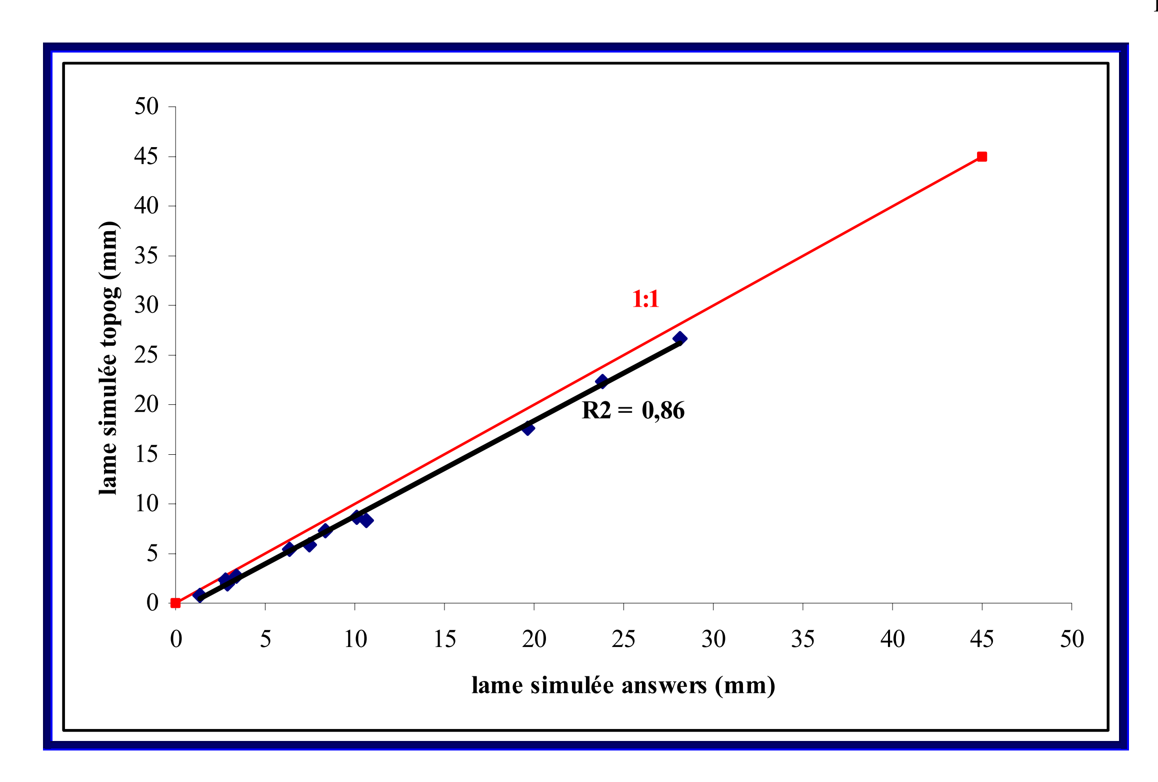


Figure 15 Comparaison entre les lames simulées avec ANSWERS et TOPOG

Pour l'année 1998, les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 16. Le coefficient de détermination de la droite de régression est de 0,86 et le coefficient Nash calculé est de 0,84.

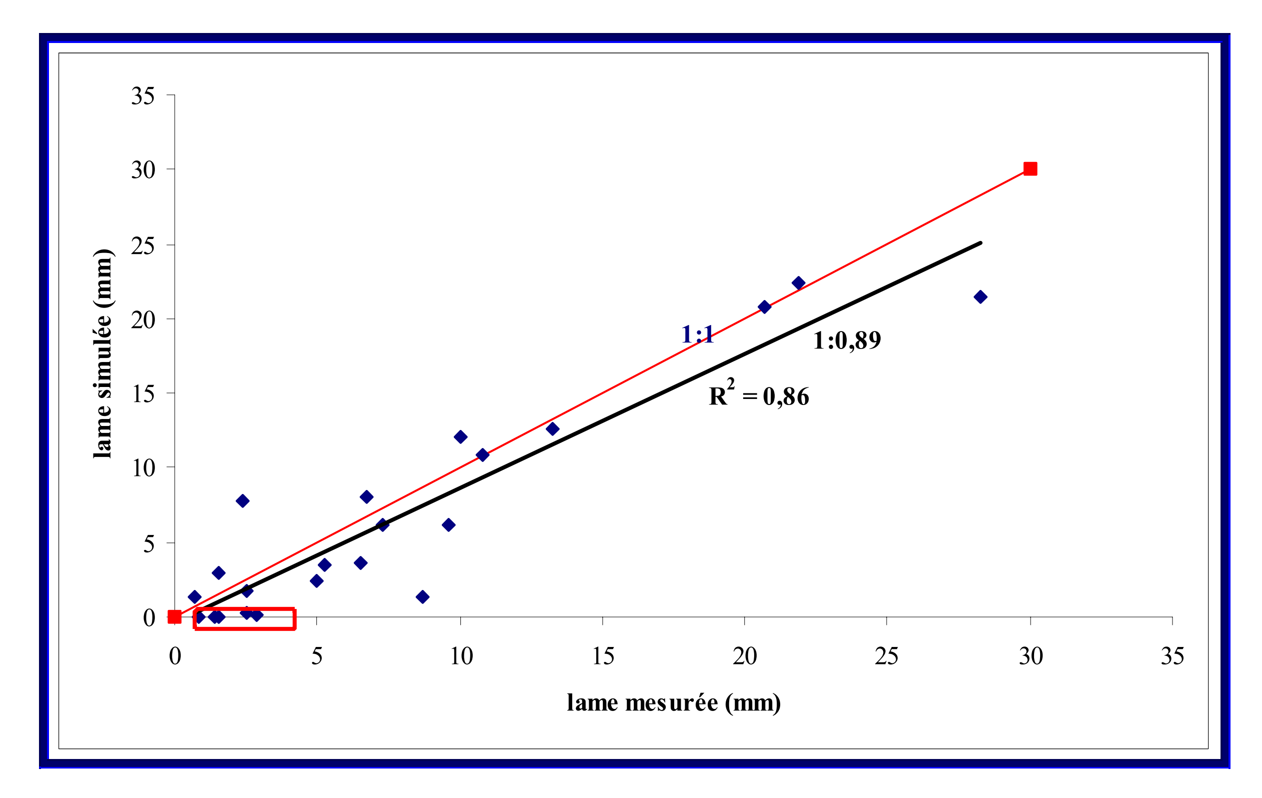


Figure 16 Comparaison des lames mesurées et simulées pour un Manning de 1.1

La droite de régression a son origine proche de zéro et la pente ne diffère pas significativement de la première bissectrice (la pente est de 0,89). Le modèle sous-estime les

résultats de la plupart des événements. Nous remarquons que pour les valeurs de pluie très faibles (comme celles des 18/06/98, 31/05/98 et de la première averse du 14/06/98) le modèle calcule des lames inférieures à celles mesurées (l'erreur est de 2,75%) ; il arrive même qu'elles soient nulles ce qui signifie que pendant ces averses (18/06/98) le bassin ne produit pas de ruissellement (événements représentés dans un carré rouge sur la Figure 16).

En comparant les résultats de cette simulation avec ceux du modèle ANSWERS nous pouvons remarquer que les résultats sont proches les uns des autres (Figure 17). Le coefficient de détermination est de 93% ; l'origine de la droite de régression est à zéro et la pente de cette droite ne diffère pas significativement de la première bissectrice (la pente est de 0,87).

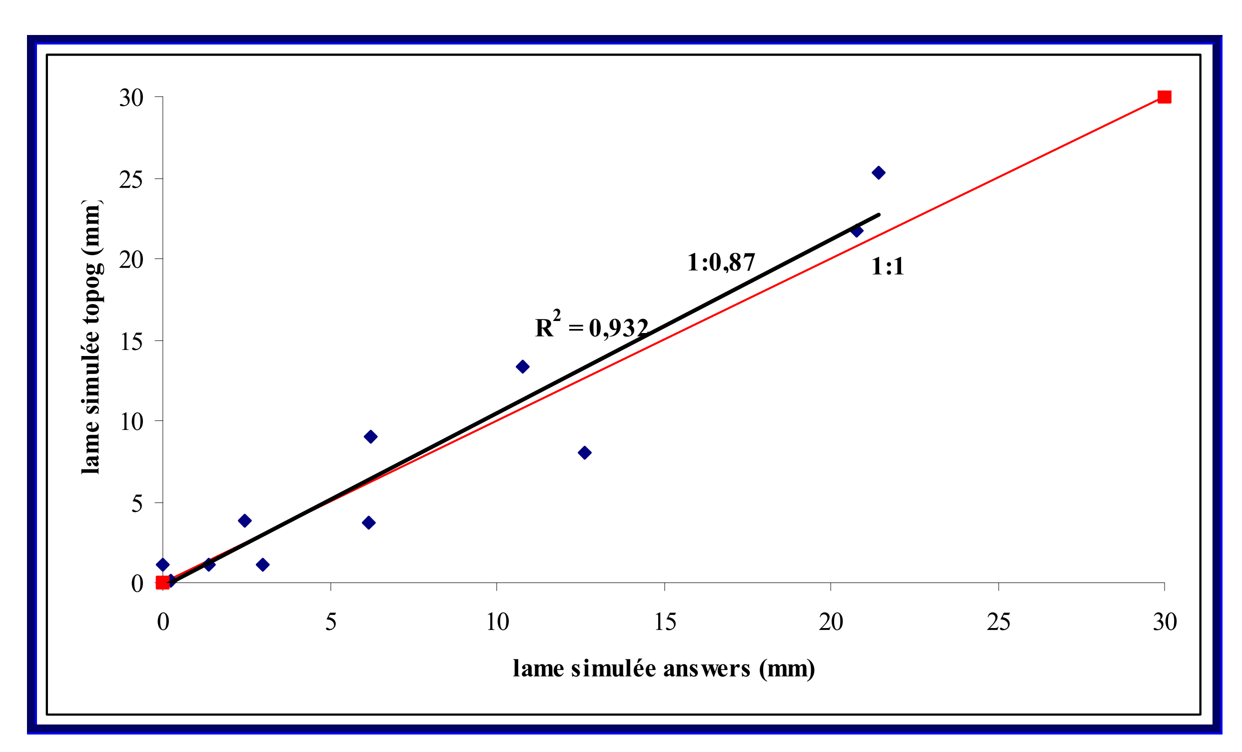


Figure 17 Comparaison entre les lames simulées avec ANSWERS et TOPOG (1998)

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure qu'en terme de lames écoulées cumulées les résultats obtenus avec le modèle TOPOG sont proches de la réalité même si le modèle a tendance à sous-estimer les résultats à l'échelle événementielle.

Nous ne disposons malheureusement pas d'un nombre suffisant d'observations pour valider le schéma de fonctionnement du bassin auquel conduit cette modélisation. C'est pour cela que nous n'avons pas utilisé la démarche habituelle de calage et de validation. A l'échelle événementielle, nous avons seulement essayé de déterminer un coefficient de Manning qui, pour une série de données, donne les meilleurs résultats, puis de tester ce coefficient sur un autre jeu de données. Dans la limite des critères utilisés, le résultat nous semble acceptable.

Les simulations effectuées sur le bassin versant de Voinesti, même si elles ne sont pas totalement satisfaisantes en terme d'adéquation des lames écoulées cumulées simulées aux lames écoulées observées, s'avèrent néanmoins riches en enseignement. D'une part, elles ont permis de bien comprendre la façon dont notre modèle fonctionne et réagit aux modifications des paramètres. D'autre part, le modèle présente dans cet exercice une réelle capacité à représenter un grand nombre de processus dont nous n'avons pas exploité toutes les ressources. Parallèlement nous avons rencontré quelques-unes des limites de la structure actuelle de TOPOG : le modèle n'utilise pas le réseau hydrographique (bien qu'il le calcule) ; le schéma de résolution de l'évapotranspiration utilise une approche exagérément compliquée compte tenu de la méconnaissance des paramètres à utiliser pour chaque classe de végétation ; il y a un problème (bogue de programmation ?) dans la résolution de l'équation de Richards (tous les essais ont échoué et nous avons finalement renoncé à cette représentation de l'écoulement dans la zone non saturée). En revanche le modèle TOPOG offre une bonne représentation de la topographie du terrain basée sur les courbes de niveau et les lignes de plus grande pente.

Pour conclure, le modèle TOPOG est un modèle de recherche, encore en développement, peu riche en explications (la notice est encore sommaire) et qui demande beaucoup de soins tout particulièrement pour le traitement de la topographie. Sous sa forme complète, TOPOG est relativement lourd et difficilement exploitable. Il exige un ordinateur puissant : au minimum 128 Mbytes de RAM, 256 Mbytes conseillés ; et au minimum 200 Mbytes de mémoire libre sur le disque dur avec un moniteur de 19 pouces de résolution 1280x1024).